

VYTIPOVÁNÍ ZKŘEHLÝCH ČÁSTÍ VT PAROVODU ODBĚREM STRUKTURNÍCH REPLIK

SELECTION OF BRITTLE PARTS OF THE VT STEAM PIPELINE BY TAKING STRUCTURAL REPLICAS

Marie Svobodová ^{a)}, Josef Čmakal ^{a)}, Michal Junek ^{a,b)} a Marie Kvapilová ^{c)}

^{a)} UJP PRAHA a.s.

^{b)} Ústav materiálového inženýrství, FS ČVUT v Praze

^{c)} Ústav fyziky materiálů, AV ČR, v. v. i.

Abstrakt

Příspěvek je praktickou ukázkou využití podrobných laboratorních výsledků materiálových zkoušek (mechanických, creepových, mikrostrukturních i chemických) pro následnou in-situ kontrolu VT parovodu, u něhož vzniklo podezření, že části potrubí mohou být zkřehlé. Ze znalosti příčiny zkřehnutí u jednoho destruktivně odebraného kusu pak bylo možno odběrem strukturních replik z vnějšího povrchu trubek vytipovat další místa, která byla následně vyříznuta, a jejich zkřehnutí bylo potvrzeno.

Abstract

The paper is a practical example of the use of detailed laboratory results of material tests (such as mechanical, creep, microstructural, and chemical tests) for subsequent in-situ inspection of VT steam pipeline, which was suspected that parts of the pipeline may be brittle. From the knowledge of the cause of embrittlement in one destructively removed piece, it was then possible to select other places by taking structural replicas from the outer surface of the pipeline. These places were subsequently cut out, and their embrittlement was confirmed.

Úvod

Při běžné provozní kontrole VT parovodního potrubí vyrobeného z materiálu 15 128.5 a o rozměrech OD 457 x 40 mm byl vyříznut segment potrubí se svarovým spojem, který pak byl rutinně destruktivně testován a u něhož bylo zjištěno zkřehnutí materiálu. Tím vzniklo podezření, že i některé další části parovodního potrubí mohou být zkřehlé, a tak byla společnost UJP PRAHA a.s. oslovena, aby se pokusila nedestruktivně (in-situ) otestovat zbytek potrubí a případná zkřehlá místa lokalizovat. K přípravě na toto in-situ testování jí byl poskytnut zbývající kus zkřehlého segmentu VT parovodu se svarovým spojem (dále značeno jako ZP) a nezkřehlý segment z rovné části parovodní trubky (dále značeno jako NP).

Experimentální zkoušky v laboratoři

Oba poskytnuté segmenty ZP a NP byly v laboratořích UJP PRAHA a.s. destruktivně zkoušeny pomocí následujících metod:

- chemický rozbor,
- rozbor mikrostruktury světelnou a elektronovou mikroskopií (SEM, TEM),
- měření tvrdosti,
- zkouška tahem,
- zkouška rázem v ohybu,
- creepová zkouška (zkoušeno v creepových laboratořích ÚFM AV ČR, v.v.i.),
- fraktografická analýza lomových ploch.

Výsledky kontroly chemického složení (viz tab. 1), provedení zkoušky tahem při okolní i zvýšené teplotě 528 °C a zkoušek rázem potvrdilo, že materiály obou kontrolovaných segmentů ZP a NP odpovídají požadavkům normy na materiál ČSN 15 128, nicméně mez pevnosti a mez kluzu jsou u materiálu ZP na dolní hranici či těsně pod intervalem tolerance a že hodnota

jeho nárazové práce při 20 °C je u obou základních materiálů ZM1 a ZM2 i svarového kovu SK velmi nízká (viz tab. 2). Vyhodnocení přechodové teploty (viz obr. 2) pro oba základní materiály ZP odpovídá zhruba + 60 °C, což svědčí o opravdu výrazném zkřehnutí.

Tab. 1: Výsledky chemického rozboru segmentů ZP a NP (v hm. %)

Segment	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al _{celk}	P	S
ZP – ZM1	0,15	0,54	0,20	0,53	0,49	0,25	0,004	0,008	0,013
ZP – SK	0,09	0,89	0,43	0,59	0,57	0,32	0,004	0,014	0,010
ZP – ZM2	0,17	0,51	0,20	0,52	0,55	0,24	0,005	0,008	0,004
NP	0,16	0,56	0,21	0,59	0,43	0,33	0,013	0,011	0,004
norma	0,10 0,18	0,45 0,70	0,15 0,40	0,50 0,75	0,40 0,60	0,22 0,35	min. 0,025	min. 0,040	min. 0,040

Tab. 2: Průměrné výsledky mechanických zkoušek segmentů ZP a NP

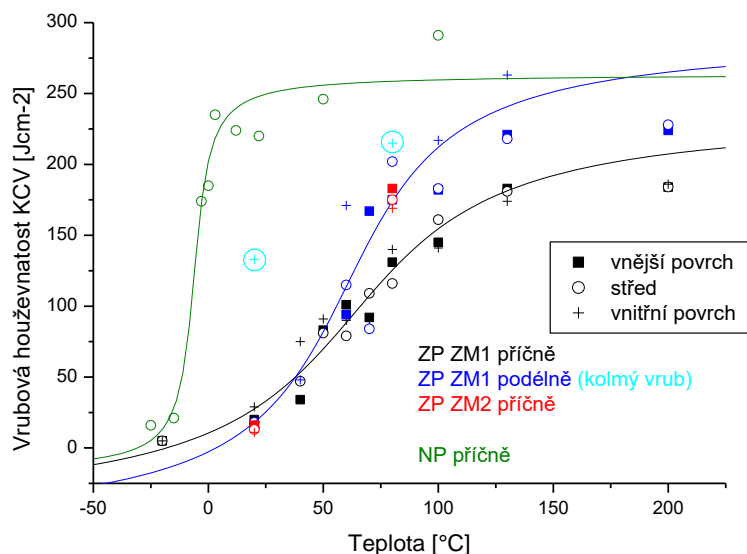
Segment	Orientace	Při teplotě 20 °C					Při teplotě 528 °C (norma pro 525 °C)		
		R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	HV	KV [J]	R _{p02} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
ZP – ZM1	příčně podélně	300	486	28,0	150	17	218	280	31,5
		323	507	29,1			223	287	32,1
ZP – SK	podélně	322	517	(16,3)	235 280	19			
ZP – ZM2	příčně	328	515	28,0	152	11			
NP	příčně	366	510	30,4	158	177	254	373	30,7
norma		min. 315	490 680	min. 18	146 207	min. 40	min. 211		

Dále byly provedeny mikrostrukturní rozborů metalografických výbrusů jak v radiálním (příčném) a axiálním (podélném) směru, tak i v tangenciálním směru (pod vnějším a vnitřním povrchem a uprostřed tloušťky stěny trubky).

Rozbor mikrostruktury NP prokázal, že ocel je vyrobena s vysokou čistotou (vměstků typu oxidu železa či sulfidů manganu je v ní velmi málo) a má homogenní strukturu prakticky po celé tloušťce, a to ve všech řezech. V axiálním směru jsou patrné karbidické řádky, které se na radiálním řezu projevují jako osamocené ostrůvky. Na vnitřním povrchu v obou směrech jsou stopy po přetváření do hloubky několika desítek μm, jinak je mikrostruktura tvořena směsí feritických a popuštěných bainitických zrn o velikosti G7 až G8 dle normy ČSN EN ISO 643. Tvar zrn je sice protažený, ale zcela náhodně, takže se nežádoucí textura netvoří.

Svarový spoj ZP je bez pozorovatelných vad. Jeho základní materiály obsahují větší množství vměstků typu oxidu železa a sulfidů manganu (převážně materiál ZM1), jejich mikrostruktura je homogenní po celé tloušťce ve všech řezech a oproti očekávání obsahuje malé množství bainitických zrn (feritická zrna převažují). Svarový kov SK je plný oxidů železa, jinak jeho mikrostruktura horního bainitu s feritickým síťovým na hranicích původních austenitických zrn s velikostí G0 až 3,5 dle ČSN EN ISO 643 odpovídá očekávání. Tepelně ovlivněné oblasti nejsou příliš široké a prakticky plynule přechází z jedné části do druhé s postupnou změnou velikosti zrna z G11 až do G4. Velikost zrna G7 až G8 platí pro oba základní materiály, přičemž

tvár zrn je sice protažený, ale zcela náhodně, takže se nežádoucí textura netvoří. Pouze v axiálním směru jsou patrné karbidické řádky, které se na radiálním řezu projevují jako osamocené ostrůvky.

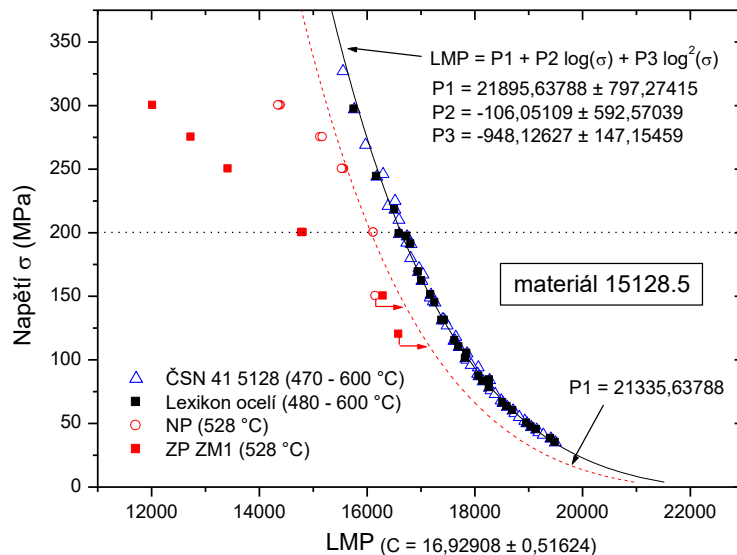


Obr. 1: Porovnání vrubové houževnatosti obou segmentů

Až na malý obsah bainitu v základních materiálech tedy nebylo ve struktuře na první pohled patrné, proč by měl být tento svarový spoj tak výrazně zkrhklý. Pokud by se mělo jednat o zkrhnutí vinou dlouhodobého vystárnutí, měla by být bainitická zrna zcela popuštěná, rozhraní mezi feritem a bainitem špatně znatelné a na hranicích zrn by se měly vyskytovat nitridy způsobující jejich oslabení a tím i zkrhnutí materiálu. Proto byl svarový spoj analyzován také pomocí elektronové mikroskopie (SEM měla stanovit stupeň popuštění bainitických zrn a TEM měla na základě bodové difrakce stanovit přítomnost nitridů a případně dalších částí na hranicích zrn). Získané výsledky ukazují na dva protichůdné jevy – bainitická zrna jsou ostře ohraničena od feritické matrice a jejich cementické desky jsou stále z velké části zachovány v původní morfologii. Přesto se na hranicích zrn objevují podlouhlé útvary primárního nebo sekundárního cementitu (typické pro rozpadlé bainitické struktury), přítomnost nitridů nebyla prokázána a velké částice sulfidů manganu ležící přes feritická zrna jsou oddělena od matrice ostrou hranicí. Původ zkrhnutí tedy pravděpodobně nebude v dlouhodobé provozní expozici, ale v tepelném zpracování parovodní trubky.

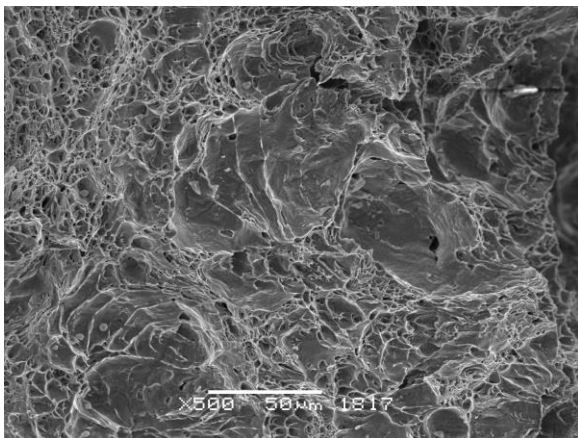
Aby byl stanoven vliv zkrhnutí na dlouhodobé vlastnosti materiálu při provozních podmínkách, byl v creepových laboratořích Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v.v.i. v Brně proveden informativní soubor krátkodobých creepových zkoušek obou segmentů. Creepové zkoušky v tahu (jednoosá napjatost) byly provedeny při teplotě 528 °C v oblasti vysokých napětí, pokrývající interval 200 až 300 MPa. Výsledky zpracované formou napěťové závislosti Larsonova-Millerova parametru ukazuje obr. 2.

Z grafu je patrné, že creepové chování obou segmentů je při vysokých úrovních napětí (a tedy při velmi krátkých zkouškách) o něco horší, než jaké je požadováno v normě, s poklesem aplikovaného napětí (k provoznímu napětí) se však jejich creepová pevnost přibližuje normativním hodnotám. Zkrhnutí materiálu segmentu ZP pak výrazně zvětšuje rozdíly mezi naměřenými a normativními hodnotami.

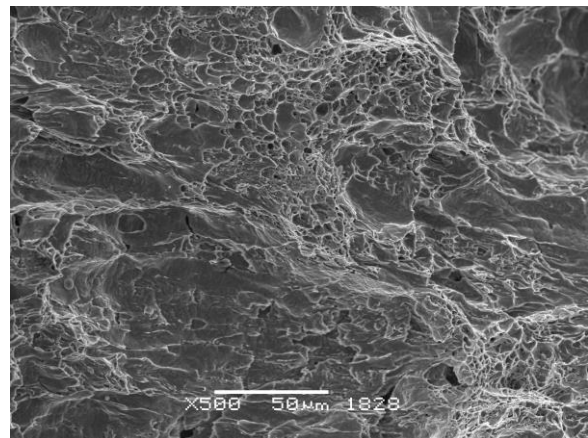


Obr. 2: Porovnání creepového chování obou segmentů

Jako poslední pak byly provedeny fraktografické analýzy vybraných lomových ploch těles po zkoušce tahem, rázem i creepu a na základě těchto velmi podrobných výsledků jsme dospěli k názoru, že zkřehnutí u segmentu ZP se projevuje štěpnými fazetami feritických zrn na lomových plochách, a to tak, že u zkřehlého materiálu ZP, jehož přechodová teplota je okolo +60 °C a nárazová práce v houževnatém stavu při 200 °C je 146 J, jsou tyto fazety prakticky rovnoosé velikostně odpovídající feritickým oblastem (obr. 3), zatímco u segmentu NP s přechodovou teplotou okolo 0 °C a nárazovou prací v houževnatém stavu při 100 °C 234 J jsou výrazně zdeformované (protážené) ve směru dynamické síly a nejsou tak časté, byť velikostně si odpovídají (obr. 4). Pomocí TEM bylo dále prokázáno, že na hranicích křehkého kusu se vyskytuje velké množství primárního cementitu, které nemohlo vzniknout provozem. Segment ZP byl tedy s největší pravděpodobností zkřehlý již ve výchozím (neprovozovaném) stavu, a to vinou špatně zvoleného (či špatně provedeného) výchozího tepelného zpracování.

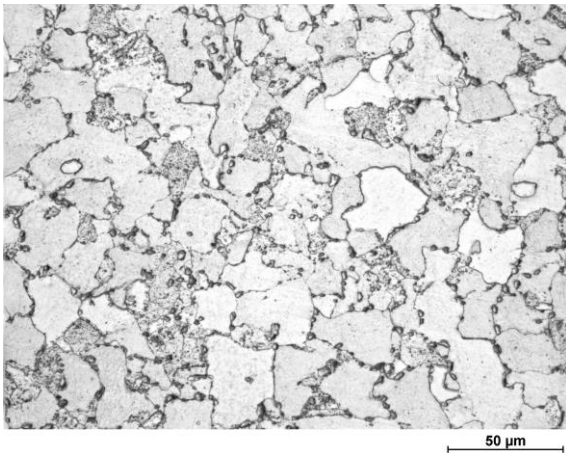


Obr. 3: SEM lomu zkřehlého segmentu

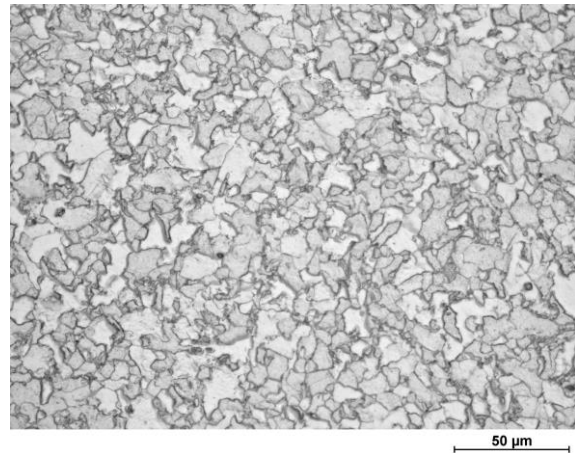


Obr. 4: SEM lomu nezkřehlého segmentu

Zkřehlý a nezkřehlý materiál se tak od sebe liší kromě hodnot vrubové houževnatosti především mikrostrukturou, a to především přítomností či nepřítomností cementitu na hranicích zrn, poměrem plošného podílu bainitu vůči feritu, stavem popuštění bainitických desek a velikostí zrna. Proto bylo rozhodnuto, že in-situ kontrola VT parovodu bude provedena odběrem strukturních replik a jejich porovnáním s replikami odebranými z vnějšího povrchu segmentů ZP a NP (viz obr. 5 a obr. 6 – zjemnění zrna na vnějším povrchu segmentu NP).



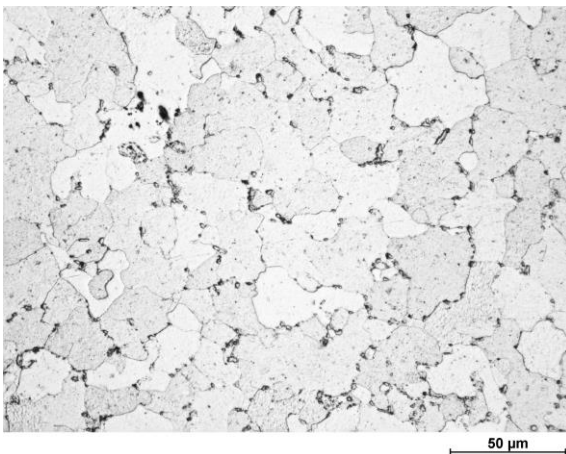
Obr. 5: Struktura zkrěhlého segmentu



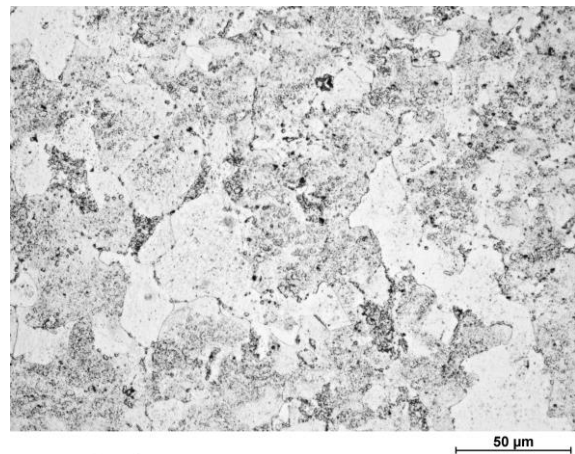
Obr. 6: Struktura nezkřehlého segmentu

In-situ kontrola VT parovodu

V provozovatelem vybraných místech byly z vnějšího povrchu VT potrubí odebrány strukturální repliky Transcopy (komerčně vyráběné společností Struers) nebo kolódiové repliky (doplňkově byla měřena i tvrdost HV5). Sejmuté otisky struktur pak byly přeneseny na laboratorní sklíčka, vystínovány napařením stříbra a prohlédnuty pomocí světelného mikroskopu Neophot 21. Poté byla provedena podrobná fotodokumentace struktur světelným mikroskopem NIKON Eclipse MA200 a elektronovým mikroskopem JEOL JSM5510 LV. Dále byly pomocí obrazového analyzátoru NIS-Elements 4.20 vyhodnoceny podíly jednotlivých strukturálních složek, stupeň jejich degradace, přítomnost cementitu na hranicích zrn, stupeň creepového poškození a byla změřena velikost zrna podle ČSN EN ISO 643. Ukázka nalezených struktur je uvedena na obr. 7 a obr. 8, výsledky kontroly jsou shrnuty v tab. 3.



Obr. 7: Struktura ve zkrěhlém místě



Obr. 8: Struktura v nezkřehlém místě

Místa, která byla detekována jako pravděpodobně křehká, byla následně vyříznuta z VT parovodu a jejich destruktivní rozbor (zkoušky rázem v ohybu se stanovením přechodové teploty a metalografický rozbor) potvrdil, že materiál byl opravdu zkrěhlý (přechodová teplota okolo +60 °C) a mikrostruktura odpovídala mikrostruktuře na obr. 5 napříč tloušťkou stěny trubky.

Tab. 3: Výsledky kontroly VT parovodu

Místo	Tvrdość HV5	Podíl feritu [%]	Přítomnost cementitu na hranicích zrn	Velikost zrna G	Zjištěná degradace		
					Strukturní [1]	Creepová [2]	Křehkost
1	155 ± 2	19,7	ne	6-6,5 a 7,5-8	D-E	1	NE
2	149 ± 5	13,2	ne	7,5	C-D	1/2a	NE
3	167 ± 5	13,3	ne	5-6 a 8	D-E	1	NE
4	139 ± 4	11,5	ne	5-6,5 a 7-8	D	1	NE
5	132 ± 4	38,7	5,3 %	8-8,5	D	1/2a	ANO
6	151 ± 6	13,3	málo	7-8	C	1	NE
7	153 ± 5	38,8	1,3 %	8-8,5	C	1	asi
8	152 ± 3	26,6	2,2 %	6 a 8,5	C-D	1	ANO
9	159 ± 4	27,8	3,5 %	8,5	C-D	1	ANO

Poděkování

Příspěvek vznikl při řešení projektu Národního centra kompetence TN01000015 (Strojírenství) za finančního přispění TA ČR.

Literatura

- [1] ERA Technology (1998): *Etalon sferoidizace feriticko-perlitických a feriticko-bainitických struktur*. Technická zpráva, CERL Report RD/L/M341, ERA Technology.
- [2] EPRI (2018): *An Informed Perspective on the Application of Replication in an Integrated Approach to the Life Management of 9%Cr Creep-Strength-Enhanced Ferritic Steel Components*. Report 3002012592, EPRI, Palo Alto (CA).