

VLIV KRÁTKODOBÉHO DEGRADAČNÍHO ŽÍHÁNÍ OCELI P92 NA ZMĚNU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ Z HLEDISKA PRECIPITACE LAVESOVY FÁZE

INFLUENCE OF SHORT-TERM AGEING AND PRECIPITATION OF LAVES PHASE ON MECHANICAL PROPERTIES OF P92 STEEL

Michal Junek^{a),b)}, Marie Svobodová^{a)} a Jiří Janovec^{b)}

^{a)} UJP PRAHA a.s., Nad Kamínkou 1345, Praha-Zbraslav

^{b)} Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Karlovo nám. 13, Praha 2

Abstrakt

Príspevek se zabývá hodnocením vlivu krátkodobého laboratorního žihání (650 °C, 100 až 20 000 hodin) martenzitické oceli P92 z hlediska probíhajících mikrostrukturních změn. V průběhu teplotní expozice dochází k postupnému procesu hrubnutí karbidických částic a precipitaci Lavesovy fáze, což má zásadní vliv na změnu mechanických vlastností dané oceli. Sledováním těchto změn probíhajících v mikrostruktuře oceli byly vytvořeny stereologické závislosti precipitujících částic, které lze korelovat s výslednými mechanickými vlastnostmi. V závěru je diskutována aplikovatelnost těchto korelací na usuzování stavu provozovaných komponent na blocích elektráren.

Abstract

The paper deals with the evaluation of the influence of short-term laboratory ageing (650 °C, 100 to 20 000 hours) of martensitic steel P92 in view of ongoing microstructural changes. During thermal exposure process, a coarsening of the carbide particles and precipitation of Laves phase has a significant effect on mechanical properties of the P92 steel. Based on these microstructural changes, stereological dependencies of Laves phase were created. These results are compared with the mechanical and creep properties.

Úvod

Klíčovým materiálem pro provoz nadkritických bloků elektráren pracujících při teplotách páry okolo 600 °C a tlacích okolo 20 MPa je 9% Cr žárovevná martenzitická ocel P92, jejíž zvýšené žárovevnosti je dosaženo precipitačním a substitučním zpevněním tuhého roztoku především zvýšeným obsahem Cr, Mo, V, Nb a W. Během provozní expozice dochází k mikrostrukturním změnám, které jsou mimo jiné doprovázeny precipitací křehké intermetalické Lavesovy fáze. Tato fáze hraje výraznou roli v průběhu provozní expozice, jelikož nepříznivě ovlivňuje mechanické a creepové vlastnosti. V první fázi vede precipitace Lavesovy fáze k ochuzení tuhého roztoku o substituční prvky jako je Mo a W, čímž je sníženo substituční zpevnění tuhého roztoku oceli. Následná precipitace a hrubnutí Lavesovy fáze na hranicích martenzitických latěk a na hranicích primárních austenitických zrn negativně ovlivňuje mechanické a creepové vlastnosti, především vrubovou houževnatost. Hrubé částice Lavesovy fáze na hranicích zrn mohou iniciovat vznik a následný rozvoj creepového kavitačního poškození.

Experimentální materiál

Experimentální práce byly provedeny na výřezech z rovné části ohybu parovodní trubky z oceli P92 o rozměrech OD 350 x 39 mm, chemické složení a výchozí mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1. První výřez označený jako výchozí stav ARI byl podroben výchozímu tepelnému zpracování (TZ) u španělského výrobce trubky (Productos Tubulares): 1050 °C/60 min + 780 °C/140 min. Druhý výřez označený jako výchozí stav ARII byl ještě dodatečně tepelně zpracován po ohnutí trubky u výrobce ohybu (MODŘANY Power, a.s.): 1050 °C/ 60 min + 775 °C/140 min. Výchozí stav ARI byl rozřezán na 5 kusů, z nichž 4 byly podrobeny degradačnímu isothermickému žihání při teplotě 650 °C po dobu 1 000 h, 5 000 h,

10 000 h a 20 000 h. Výchozí stav ARII byl rozřezán na 9 kusů, z nichž 8 bylo podrobeno stejnému degradačnímu žíhání při teplotě 650 °C po dobu 100 h, 200 h, 500 h, 1 000 h, 2 000 h, 5 000 h, 10 000 h a 20 000 h. Po laboratorních expozicích byly ze všech stavů vyrobeny vzorky pro kontrolu mikrostruktury, měření tvrdosti, zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu a creepové zkoušky. Výroba creepových vzorků a creepové zkoušky s následným vyhodnocením probíhala v kooperaci s Ústavem fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Rozbor mikrostruktury

Mikrostruktura výchozích stavů ARI a ARII je srovnatelná, v obou případech je tvořena popuštěným martenzitem s jemnými karbidy $M_{23}C_6$ na hranicích primárního austenitického zrna, martenzitických latěk a uvnitř sub zrn (MX částice), viz ukázka na obr. 1a, b. V průběhu teplotních expozic dochází k dalšímu popuštění martenzitické matrice, hrubnutí karbidických částic $M_{23}C_6$ a k precipitaci a následnému růstu Lavesovy fáze $(Fe,Cr)_2(Mo,W)$.

V případě výchozího stavu ARII (dvojitá TZ) dochází již po 100 h teplotní expozice při 650 °C k precipitaci Lavesovy fáze o velikosti ~350 nm s objemovým podílem ~0,04 %. V průběhu prvních 2 000 h expozice dochází k výraznému hrubnutí této fáze (~610 nm), zvýšení objemového podílu (~1,55 %), zvýšení počtu částic a snížení volné mezičásticové vzdálenosti. Při delších expozičních dobách (až 20 000 h) je objemový podíl Lavesovy fáze téměř konstantní, vlivem koagulace dochází k mírnému hrubnutí (~880 nm) a s tím spojenému snižování počtu částic, viz závislosti na obr. 2. Výchozí stav ARI (primární TZ) má z hlediska precipitace a následného růstu Lavesovy fáze obdobný charakter jako v případě výchozího stavu ARII. Ale s tím rozdílem, že objemový podíl Lavesovy fáze se po cca 2 000 h ustálí na cca poloviční hodnotě (~0,67 %) s cca třetinovou velikostí částic (~440 nm), viz grafické závislosti na obr. 2. obr. 1c, d porovnává snímky Lavesovy fáze po 20 000 h expozice, na kterých je patrný rozdíl velikosti Lavesovy fáze stavu ARI a ARII. Snímky byly pořízeny elektronovým mikroskopem v režimu zpětně odražených elektronů.

Mechanické vlastnosti

Výchozí mechanické vlastnosti stavů ARI a ARII jsou téměř totožné, viz tabulka 1. Následné teplotní expozice těchto stavů, které prokázaly rozdílné chování z hlediska precipitace Lavesovy fáze, neměly výrazný vliv na hodnoty tvrdosti a pevnosti exponovaných vzorků, viz tabulka 2. Naopak tomu bylo v případě zkoušek rázem v ohybu, kdy u stavu ARII (hrubší Lavesova fáze) došlo s rostoucí dobou teplotní expozice k postupnému posunu přechodové teploty z výchozích -21 °C k +97 °C. U výchozího stavu ARI takovýto plynulý posun přechodové teploty s rostoucím časem teplotní expozice pozorován nebyl, přechodová teplota se již po 5 000 h expozice posunula z výchozích -43 °C k +74 °C, kde zůstává konstantní i při delších expozičních časech, viz obr. 3. Creepové zkoušky při 600 °C a 650 °C prokázaly, že i velmi krátké teplotní expozice výchozích stavů vedou ke snížení creepové životnosti [1]. Roli hraje i výše aplikovaného tahového napětí, čím vyšší je napětí, tím menší je pokles creepové životnosti exponovaných vzorků. Dále lze přijmout stanovisko, že výchozí stav ARII vykazuje nižší creepovou odolnost než stav ARI, viz obr. 4.

Závěr

Z rozdílného chování výchozích stavů ARI a ARII z hlediska precipitace Lavesovy fáze lze usuzovat, že dvojitá teplená zpracování vede ke zhoršení strukturní stability oceli P92. Tomu odpovídají i nalezená data v literatuře [2], kde velikost Lavesovy fáze odpovídá námi změřeným velikostem u stavu ARI, viz obr. 1a. Podíl a velikost fáze nemá výrazný vliv na tvrdost a pevnost oceli, ale výrazněji se projevuje v případě creepové životnosti a posunu přechodové teploty. Krátkodobé laboratorní žíhání vzorků vede k významnému snížení creepové životnosti oceli P92 ve srovnání s úrovní creepové životnosti výchozích stavů, s tím že nejmarkantnější pokles je pozorován při zkušební teplotě 600 °C již po 500 h expozice.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektů 2A-1TP1/057, TA02010260, TH020200295 a studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/215/OHK2/3T/12.

Literatura

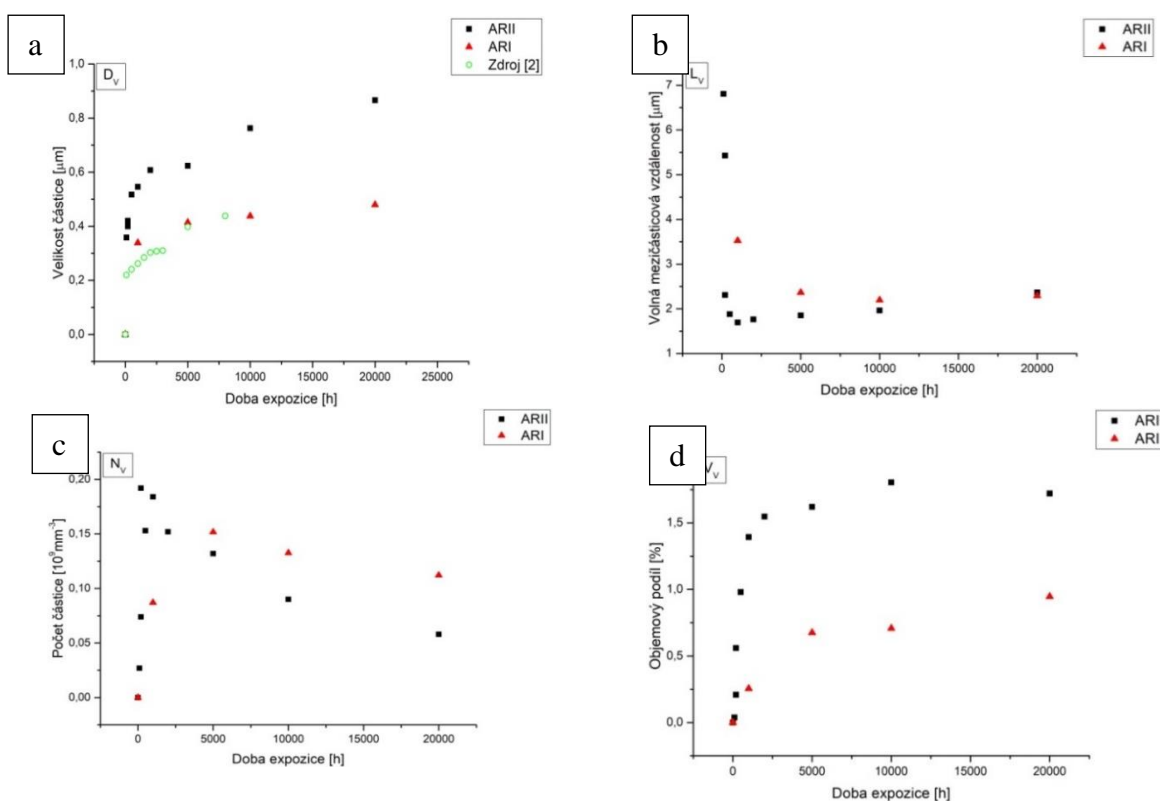
- [1] Sklenicka, V., Kucharova, K., Svobodova, M., Kral, P., Kvapilova, M., Dvorak, J. (2018): *The effect of a prior short-term ageing on mechanical and creep properties of P92 steel.* Materials Characterization, Vol. 136, pp. 388-397. ISSN 1044-5803
- [2] Wang, Xue; Xu, Qiang; Yu, Shu-min; Hu, Lei; Liu, Hong; Ren, Yao-yao (2015): *Laves-phase evolution during aging in 9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb steel for USC power plants.* Materials Chemistry and Physics, Vol. 163, pp. 219-228. ISSN 0254-0584

Tabulka 1: Chemické složení v hmotnostní % a výchozí mechanické vlastnosti oceli P92

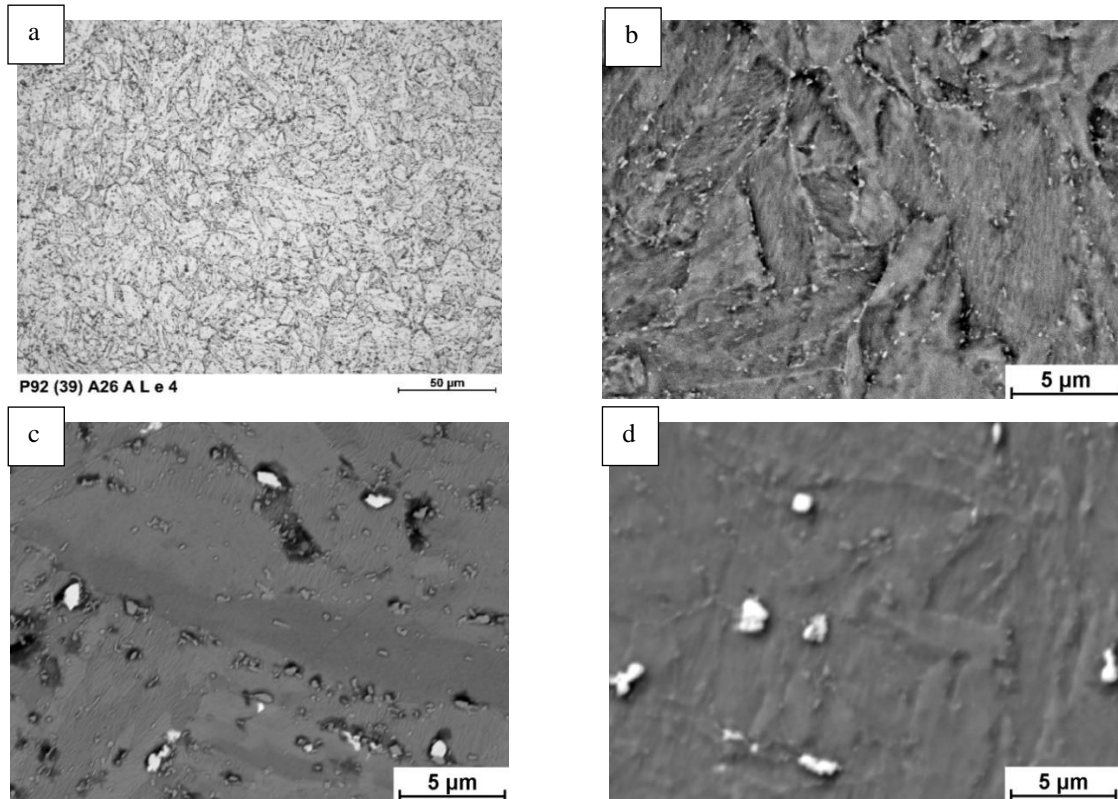
Mat.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N	W	Ostatní
60074	0,11	0,37	0,48	0,013	0,005	8,58	0,33	0,23	0,06	0,037	1,62	B0,002;Al0,02
Mat.	Mez kluzu $R_{p0,2}$			Mez pevnosti R_m			Tažnost A		Tvrdost			
60074	555 MPa			737 MPa			23,7 %		218 HB (233 HV)			
ARI	557 MPa			718 MPa			22,4 %		223 HV10			
ARII	558 MPa			724 MPa			23,0 %		229 HV10			

Tabulka 2: Mech. vl. stavu ARI a ARII v průběhu teplotní expozice ($R_{p0,2}$; R_m - MPa; T_p - °C)

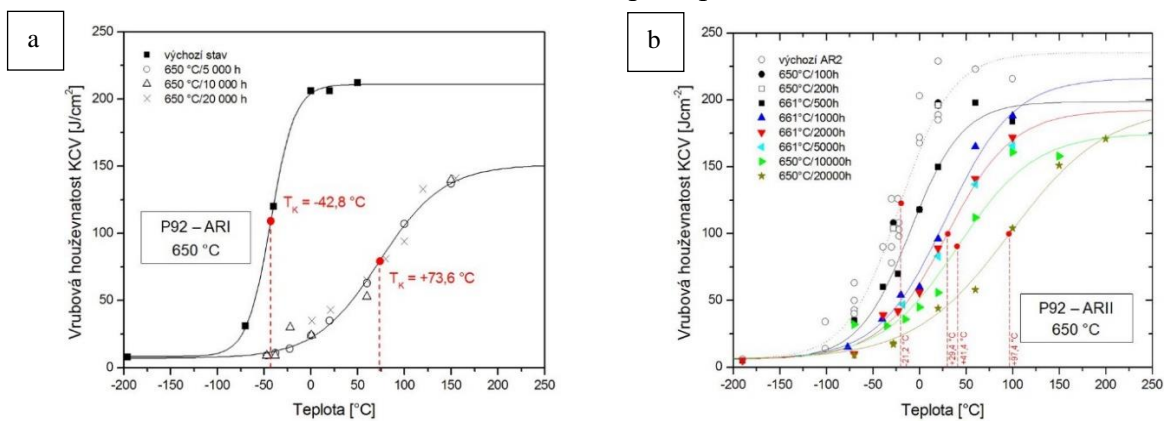
Stav	0 h				5 000 h				10 000 h				20 000 h			
	HV	$R_{p0,2}$	R_m	T_p	HV	$R_{p0,2}$	R_m	T_p	HV	$R_{p0,2}$	R_m	T_p	HV	$R_{p0,2}$	R_m	T_p
ARI	223	557	718	-43	215	515	685	+74	212	520	695	+74	213	518	669	+74
ARII	229	558	724	-21	223	533	695	+30	223	524	682	+41	210	487	682	+97



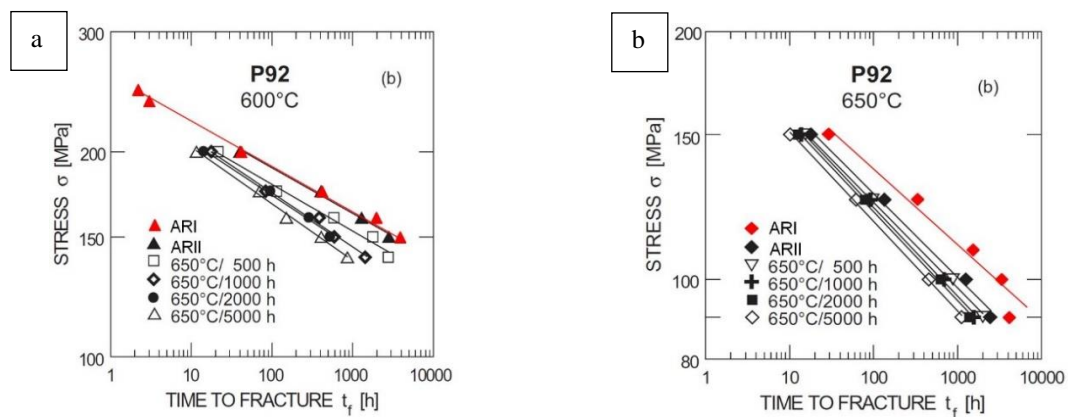
Obr. 1: Závislosti růstu Lavesovy fáze v průběhu expozice při 650 °C: a) velikosti částic, b) volné mezičásticové vzdálenosti, c) počtu částic, d) objemového podílu částic



Obr. 2: Porovnání mikrostruktury oceli P92: a, b) výchozí stav ARII; c) stav ARI po expozici 650 °C/20 000 h; d) stav ARII po expozici 650 °C/20 000 h



Obr. 3: Změny KCV v závislosti na teplotě: a) výchozí stav ARI, b) výchozí stav ARII



Obr. 4: Závislost napětí na době do lomu: a) pro 600 °C, b) pro 650 °C [1]