

Využití simulátoru teplotních cyklů pro optimalizaci tepelného zpracování polotovaru z oceli P92

Tento článek se zaměřuje na optimalizaci tepelného zpracování oceli P92, která je nezbytným předpokladem pro získání vyváženého poměru pevnosti, houževnatosti a rovněž vlastností dlouhodobého tečení. Modelové tepelné zpracování bylo provedeno na silnostěnné trubce a výsledky získané u skutečné trubky byly porovnány s mechanickou pevností a nárazovou houževnatostí materiálu, který podstoupil cyklus tepelného zpracování v simulátoru tepelného cyklu. V článku je obsažena také metalografická analýza.

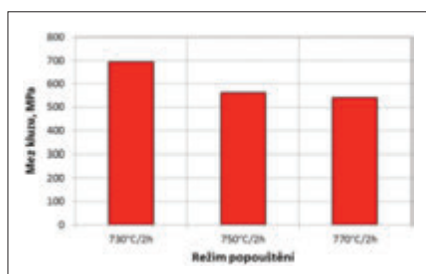
ÚVOD

Účinnost elektráren má vliv na množství spotřebovaného vstupního paliva, vyrobené elektrické energie a množství emisí CO₂, unikajících do okolního prostředí. U tepelných elektráren lze tuto účinnost zlepšit zvýšením maximálního provozního tlaku a teploty. V současné době je proto akcentován požadavek na zvyšování provozních parametrů [1]. Tlaky přesahující 260 barů a teploty do 600°C jsou považovány za tzv. nadkritické parametry, tlaky

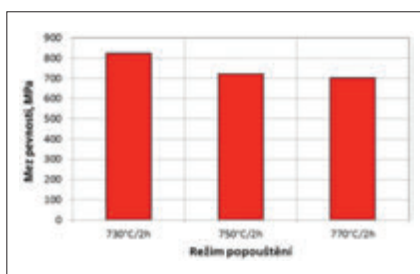
1) Austenitizace trubky: Ohřev rychlostí 150°C/h, výdrž 90 min na teplotě 1 060°C, ochlazení do oleje	
2) Popouštění segmentů:	
1. segment	730°C/2h
2. segment	750°C/2h
3. segment	770°C/2h
4. segment	bez popouštění

Při popouštění byl použit režim: rychlost ohřevu 150°C/h, rychlost ochlazování 150°C/h do teploty 400°C a následně ochlazování volně na vzduchu.

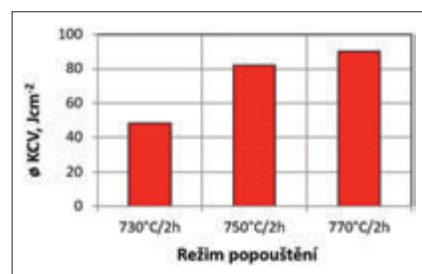
Tab. 1 – Tepelné zpracování zkušební materiálu



Obr. 1 – Závislost meze kluzu na režimu popouštění



Obr. 2 – Závislost meze pevnosti na režimu popouštění



Obr. 3 – Srovnání velikostí nárazové práce pro různé režimy popouštění



Obr. 4 – Průměrná tvrdost HV30 v závislosti na režimu tepelného zpracování

nad 300 barů a teploty přes 600°C se nazývají ultra-superkritické parametry páry [2].

Požadavek na zvyšování účinnosti elektráren zároveň úzce souvisí s nutností používat progresivní materiály, na které jsou kladeny stále vyšší požadavky, neboť eventuální selhání některého z dílů tlakového celku energetického zařízení by mohlo mít fatální následky. Aby se nehodám předcházelo, věnuje se zvýšená pozornost jak metalurgické kvalitě vstupního materiálu, kontrole jeho výchozích vlastností, pevnostním výpočtům jednotlivých dílů a v neposlední řadě také procesu svařování jako hlavnímu způsobu montáže tlakového systému. V popředí zájmu je proto výzkum modifikovaných 9 až 12% Cr ocelí s dobrou odolností proti tečení, kdy je požadavek na hodnotu střední meze pevnosti při tečení při teplotě 600°C za 100 000 hodin vyšší než 100 MPa [3]. Jednou

Segment	Tvrdosti HV30					
	1	2	3	4	5	Ø
Po kalení	433	428	439	426	424	430
730°C/2h	262	268	265	261	258	263
750°C/2h	228	233	226	233	227	229
770°C/2h	223	224	228	225	222	224

Tab. 4 – Výsledky měření tvrdosti HV30 pro různé režimy popouštění

z hlavních představitelů nových značek chromových modifikovaných ocelí je martenzitická ocel označovaná jako X10 CrWMoVNb 9-2 známá také jako ocel P 92 [4]. Aby bylo dosaženo optimálních hodnot pevnosti a žáropevnosti, je třeba ocel P92 podrobit dokonalému tepelnému zpracování.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální šetření bylo prováděno na trubce Ø 273 × 28 mm z oceli P 92. Trubka byla vyrobena v ocelárně ŽĎAS, a.s., postupem vytavení na elektrické obloukové peci s následnou aplikací postupů sekundární metalurgie LF+VD s odlitím do ingotu a následným překováním. Finální trubka byla dodána ve stavu po jakostním tepelném zpracování, na které pak navazovalo modelové tepelné zpracování zkušebních segmentů, jehož parametry jsou uvedeny v tab. 1.

Na takto připravených segmentech byly provedeny následující zkoušky:

- zkouška tahem při +20°C, stanovení R_m, R_e, A₅, Z.
- zkouška rázem v ohybu při +20°C.
- zkouška tvrdosti HV30.
- zkouška mikrostruktury.

U nepopuštěného segmentu byla provedena pouze zkouška tvrdosti a analýza mikrostruktury.

Výsledky zkoušky tahem

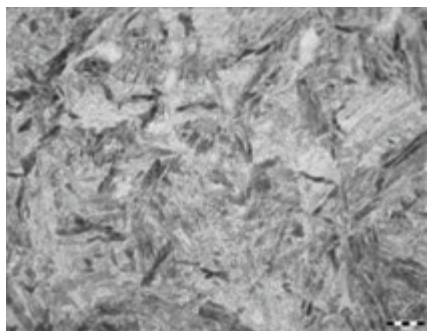
Zkoušky tahem byly provedeny na zkušebních tělesech kruhového průřezu, připravených v příčném směru segmentů, tzn. ve směru identickém s tangenciálním směrem původní trubky. Zkoušení vzorků probíhalo při laboratorní teplotě v režimu konstantního pohybu pístnice rychlostí 2 mm/min. V průběhu každé

zkoušky byla zaznamenávána síla a podélná prodloužení měřena extenzometrem. Výsledky zkoušek tahem jsou prezentovány v grafické podobě na obr. 1 a obr. 2.

Výsledky mechanických zkoušek ukazují, že pevnostní vlastnosti segmentů jsou v souladu s požadavky materiálového standardu (mez kluzu nad 440 MPa, mez pevnosti 620 až 850 MPa, tažnost min. 17 %), přičemž v souladu s očekáváním se projevilo zvýšení tepoty popouštění poklesem pevnostní úrovně, přičemž ovšem byl zaznamenán pouze minimální rozdíl jak na mezi kluzu tak i na mezi pevnosti mezi teplotami popouštění 750 a 770°C.

VÝSLEDKY HODNOCENÍ VRUBOVÉ HOUŽEVNOSTI

Hodnocení velikosti nárazové práce bylo provedeno rovněž u tří segmentů, vždy na třech zkušebních tyčích odebraných v tangenciálním směru původní trubky. Zkoušky byly



Obr. 5 – Detail struktury nepopuštěného segmentu - zv. 500x

prováděny při laboratorní teplotě. Výsledky jsou shrnuty na obr. 3. Jelikož materiálový list specifikuje velikost nárazové práce při teplotě +20°C v příčném směru ve výši 27 J, je zřejmé, že tomuto požadavku všechny režimy tepelného zpracování bezesbýtku vyhovují.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ TVRDOSTI

Hodnocení mechanických vlastností bylo doplněno o měření tvrdosti, provedené na zkušebních tělíscích Charpy-V a na vzorku připraveném pro metalografickou analýzu segmentu, který byl ponechán ve stavu po zakalení a nebyl popuštěn. Na každém vzorku bylo namátkově provedeno 5 vpichů, jejichž výsledky včetně průměrné hodnoty jsou uvedeny v tab. 4. Při měření tvrdosti bylo použito metody podle Vickers se zatěžující silou 30 kp (HV30). V podobě grafického srovnání vlivu jednotlivých režimů TZ na tvrdost jsou tyto výsledky uvedeny na obr. 4.

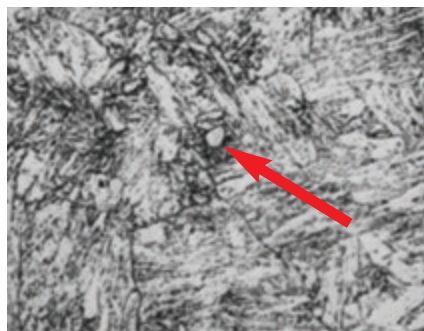
Z výsledků měření tvrdosti je jasné, že aplikace popouštění snižuje původní tvrdost na úrovni cca. 430 jednotek HV30 na hodnoty v rozmezí 220-260 HV30, přičemž v souladu s očekáváním, výsledky mechanických zkoušek i předpokládanými fyzikálně-metalurgickými pochody klesá tvrdost s rostoucí teplotou popouštění. Vzhledem k tomu, že doporučené

rozmezí hodnot tvrdosti oceli P 92 se pohybuje od 193 do 265 HV30, vyhovují z pohledu dosažované tvrdosti všechny režimy popouštění.

VÝSLEDKY METALOGRAFICKÉHO ŠETŘENÍ

Na všech segmentech byla provedena mikrostruktura analýza, a to na výbrusu orientovaném v tangenciálním směru. Příklady metalografických snímků, provedených při zvětšení 500x jsou zachyceny na obr. 5 a obr. 6.

V případě segmentu, který nebyl podroben popouštění, je mikrostruktura martenzitická jehlicovitá, u vzorků ostatních je pak tento martenzit popuštěn, což se na metalografickém výbrusu projevuje zvýrazněním hranic jehlic martenzitu v důsledku jejich dekorování karbidickými částicemi. U všech tří režimů popouštění byly ve struktuře ojediněle nalezeny drobné ostrůvky δ -feritu, které nebylo možné identifikovat v případě zakalené struktury u vzorku bez popouštění, avšak s ohledem k mechanismu



Obr. 6 – Detail struktury segmentu 3 (popuštěno 770°C/2h), šipkou označen δ -ferit - zv. 500x

jeho vzniku musí být tyto ostrůvky přítomny již v zakaleném stavu.

VYUŽITÍ SIMULÁTORU TEPLŮNÍCH CYKLŮ PRO OPTIMALIZACI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Pro optimalizaci tepelného zpracování oceli P92 byl využit simulátor teplotních cyklů vlastní konstrukce. Výkonová část teplotního simulátoru je řešena pomocí spínaných DC zdrojů. Ovládání a zabezpečení je řešeno pomocí tlačítkového ovládacího panelu s napojením na PLC automat. Tímto způsobem je řešeno spínání výkonových členů, otevírání a zavírání vakuového zvonu, ovládání hlavních ventilů pro chladicí média a ovládání vakuové pumpy.

Tento simulátor, u něhož lze přesně definovat a také změřit ochlazovací větev tepelného zpracování, lze plně využít pro výzkum a vývoj tepelného zpracování a svařování. Díky přesnému definování celého teplotního průběhu tepelného zpracování nebo svařování umožňuje tento simulátor vysokou míru opakovatelnosti výsledků. Na obrázku 7 je celkový pohled na simulátor, obrázek 8 zachycuje vzorek při ohřevu na požadovanou teplotu.

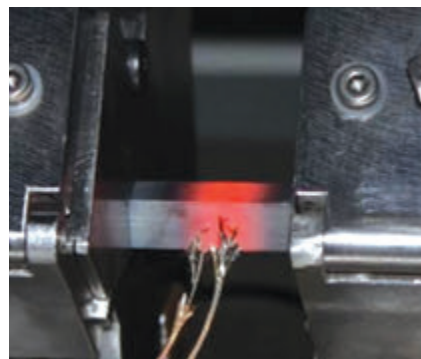
Na tomto simulátoru byla provedena simulace austenitizace na vzorcích z oceli P92 režimem: ohřev 10°C/s do 1 060°C/30s, se dvěma variantami rychlosti ochlazování, a to 5°C/s



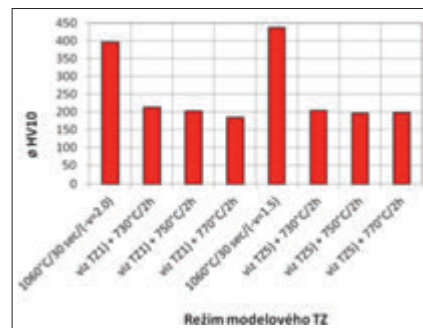
Obr. 7 – Celkové uspořádání teplotního simulátoru, zkušební vzorek je umístěn ve vakuovacím zvonu

a 13°C/s. Při kalení reálné trubky odpovídá rychlost 13°C/s kalení do vody, rychlost 5°C/s odpovídá kalení do oleje.

Vzorky byly dále podrobeny popouštěním režimem 730°C/ 2 h, 750°C/2 h a 770°C/2 h. Jeden vzorek byl ponechán bez popouštění. Na



Obr. 8 – Ohřev vzorku během experimentu



Obr. 9 – Průměrná tvrdost HV v závislosti na režimu simulace tepelného zpracování

obr. 9 jsou uvedeny výsledky měření tvrdosti vzorků s nasimulovaným režimem tepelného zpracování. Na obr. 10 je srovnání dosažených výsledků měření tvrdosti na reálné trubce a na simulovaných vzorcích. Z obrázku je vidět poměrně dobrá shoda naměřených hodnot.

ZÁVĚR

Na základě provedených analýz mechanických vlastností segmentů trubky $\varnothing 273 \times 20$ mm z oceli P92 zpracovaných kalením do oleje a popouštěním při teplotách 730, 750 a 770°C lze konstatovat, že jak vlastnosti, tak i mikrostruktura vzorků zcela odpovídá požadavkům na tuto ocel kladeným. Rovněž i mikrostruktura

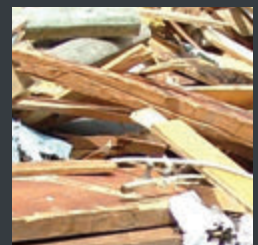
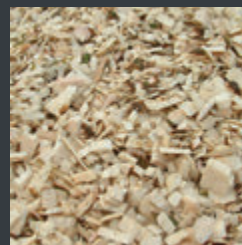
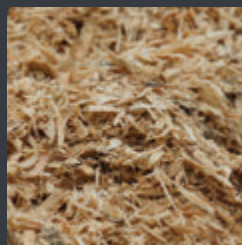
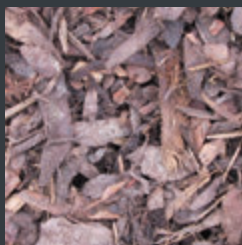


1 - 100 MW

VYNCKE



ENERGIE Z BIOMASY A ODPADŮ



tvorená martenzitem, resp. popuštěnou martenzitickou strukturou s omezeným obsahem δ -feritu (pod 5 %) je v souladu s předpoklady a zařazením oceli P92 do skupiny martenzitických žárupevných ocelí. S využitím simulátoru teplotních cyklů byly navrženy optimalizované parametry tepelného zpracování trubky $\varnothing 273 \times 28$ mm z oceli P92. Vhodná teplota austenitizace je 1060°C s dobou výdrže 90 minut a rychlost ochlazování 13°C/s, což odpovídá ochlazení do vody. Vhodná teplota popouštění je 750°C s výdrží 120 minut.

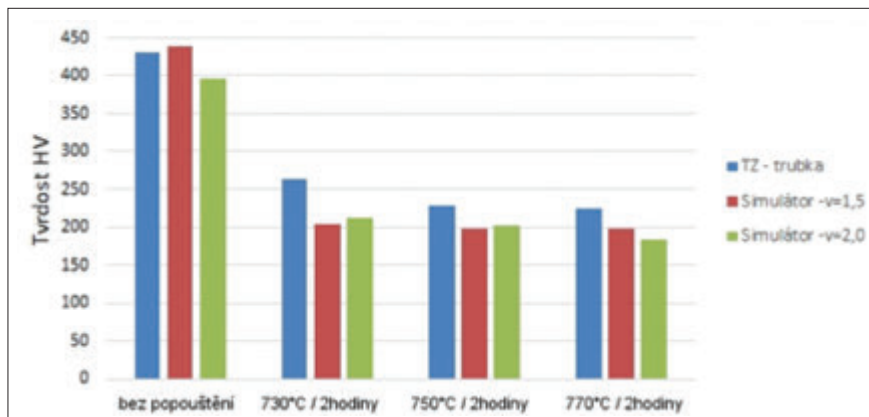
Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektu FR-TI3/206.

Ing. Lukáš Havelka, Flash Steel Power, a.s.
doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.,
VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní
Dr. Ing. Zdeněk Kuboň, Materiálový
a metalurgický výzkum, s.r.o.

LITERATURA

[1] ZHENG-FEI HU. Heat-Resistant Steels, Microstructure Evolution and Life Assessment



Obr. 10 - Srovnání tvrdostí vzorků ze simulátoru s reálnou trubkou

in Power Plants. Thermal Power Plants, Edited by Mohammad Rasul, InTech, 2011, Croatia, ISBN 978-953-307-952-3

[2] CHEN, Q.- SCHEFFKNECHT, G. Boiler design and materials aspects for advanced steam power plants. In: Proceedings of COST Programme part II: Materials for Advanced Power Engineering 2002, Vol. 21, ISBN: 3-89336-312-2

[3] MOHYLA, P.- KUBON, Z.- CEP, R.- SA-

MARDZIC, I. Evaluation of Creep Properties of Steel P92 and its Welded Joint. Metalurgija, vol. 53, No. 2, 2014, ISSN 0543-5846. p.175-178

[4] 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. Únor 2008

Utilisation of a temperature cycle simulator for optimising the thermal processing of P92 semi-finished products

This article is focused on the optimization of heat treatment of P92 steel, which is a necessary prerequisite for obtaining the balances strength, toughness as well as long-term creep properties. The model heat treatment was carried out on a thick-walled pipe and the results obtained on the real pipe were compared with mechanical strength and impact toughness of a material that underwent the heat treatment cycle in the thermal cycle simulator. The metallographic analysis is included in this article, too.



Vás zve na odbornou konferenci
„Robotické svařování“

ROBOWELDING 2016

7. – 8. 4. 2016

www.robowelding.cz

Témata konference:

Roboty pro svařování
 Svařovací zdroje pro robotické svařování
 Polohovačla, přípravky a jiná zařízení pro robotické svařování
 Kvalita svarových spojů
 Výrobní problémy při robotickém svařování

Místo konání:
 HORSKÝ HOTEL VIDLY****
 Vidly u Karlovy Studánky
www.vidly.cz



all-for power