

# Je ocel T24 vhodná pro membránové stěny USC kotlů?

Tento příspěvek řeší druhotné tvrzení svarových spojů oceli T24 při jejich dlouhodobém vystavení v rozsahu provozních teplot. Pozorované tvrzení souvisí s druhotným srážením rozptýlených částic. Ocel T24 se již používá pro membránové stěny USC kotlů. Existuje snaha o upouštění od tepelného ošetření po svaření při výrobě MWW. Předložené experimentální výsledky prokazují, že míra druhotného tvrzení závisí na aplikaci PWHT. Netemperované svary vykazují při vystavení provozní teplotě nepříjemný nárůst tvrdosti a snížení pevnosti.

## Úvod

Od konce osmdesátých let 20. století probíhá v celosvětovém měřítku intenzivní vývoj směřující ke zvýšení účinnosti tepelných elektráren. Hlavním způsobem, jak zvýšit tepelnou účinnost, je zvýšit parametry páry na tzv. nadkritické neboli super-kritické. Tlak přes 260 bar a teplota kolem 600 °C jsou považovány za super-kritické parametry páry, tlak nad 300 bar a teplota nad 600 °C jsou označovány jako ultra-super-kritické (USK) parametry [4].

S vývojem tepelných elektráren musí korespondovat vývoj žárovečných ocelí. Je požadována vyšší mez pevnosti při tečení, vynikající odolnost proti oxidaci a v neposlední řadě odolnost proti korozi za zvýšených teplot. V oblasti nízkolegovaných ocelí je celosvětově nejrozšířenější 2,25%Cr-1%Mo ocel 10CrMo9-10 označovaná též jako T22, případně ocel 13CrMo4-4. Tyto oceli nemají dostatečnou pevnost při tečení, pokud by měly být použity jako materiál na membránové stěny kotlů se super-kritickými parametry. Tento fakt vedl v devadesátých letech minulého století k vývoji nových perspektivních ocelí pro membránové stěny, označených jako T23 (7CrWVMoNb9-6) a T24 (7CrMoVTiB7-7). Oceli T23 a T24 vykazují vynikající mechanické vlastnosti za zvýšených teplot, vyznačují se rovněž zlepšenou svařitelností.

Záměrem tvůrců ocelí T23 resp. T24 bylo vyvinout materiál pro výrobu membránových stěn, který bude mít vysokou creepovou odolnost a zároveň jej bude možno svařovat bez předehřevu a bez tepelného zpracování po svařování. Tuzemské zkušenosti se svařováním CrMoV oceli 15128, jejíž matrice je stejně jako u ocelí T23 a T24 zpevněná částicemi MX, však jednoznačně poukazují na nutnost tepelného zpracování svarových spojů po svaření.

Rovněž teoretická východiska vysvětlují potřebu popouštění svarových spojů ocelí legovaných vanadem, případně titanem a niobem. Podstatou vysoké žárovečnosti u těchto ocelí je disperze jemných částic MX, které se vyznačují vysokou rozměrovou stabilitou v průběhu dlouhodobé teplotní expozice. Na druhé straně však přítomnost disperze částic MX výrazně ovlivňuje plastické vlastnosti ocelí. Během provozu dochází k tzv. sekundárnímu vytvzování. Po obvyklém tepelném zpracování, které se skládá z normalizace a následného popouštění při teplotách do 760 °C, není ve struktuře těchto ocelí dosaženo zcela rovnovážného stavu. Během následné dlouhodobé expozice při pracovní teplotě dochází k dodatečné precipitaci částic MX v důsledku přesycení tuhého roztoku. Tento proces se nejvýrazněji projevuje v oblasti svarových spojů, kde dochází vlivem svařovacího

procesu k různému stupni rozpuštění dispergovaných částic. Pokud svarové spoje nejsou následně popuštěny nebo jsou špatně popuštěny, není struktura v rovnovážném stavu a během následné teplotní expozice dojde k sekundárnímu vytvzování vlivem dodatečné precipitace disperzních částic.

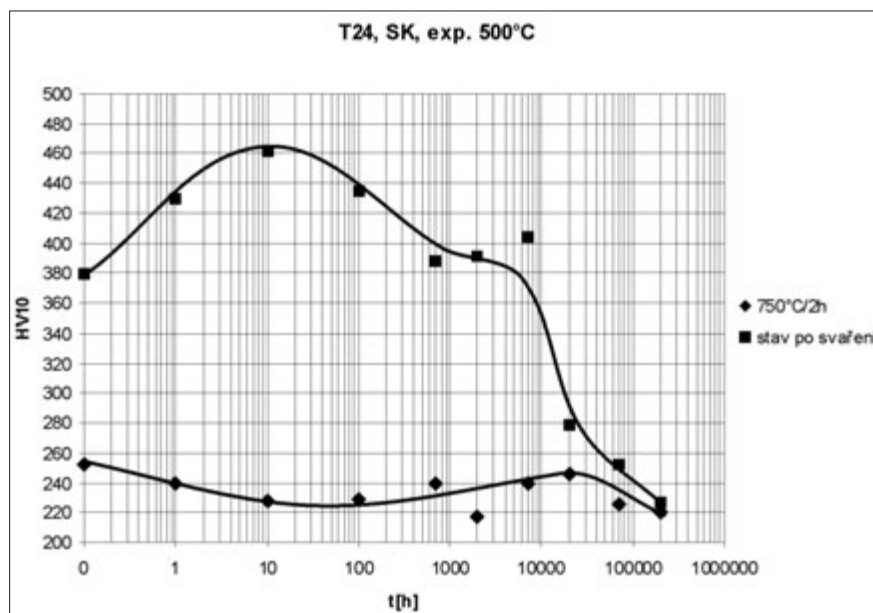
V Evropě se v současné době budují ultra-super-kritické (USC) bloky tepelných elektráren s využitím ocelí T23 a T24. Výstavbu však provázejí

zásadní problémy. Doposud se membránové stěny z oceli T24 svařují bez popouštění, avšak již v procesu výroby, nebo následně ve zkušebním provozu dochází k masivnímu praskání svarových spojů.

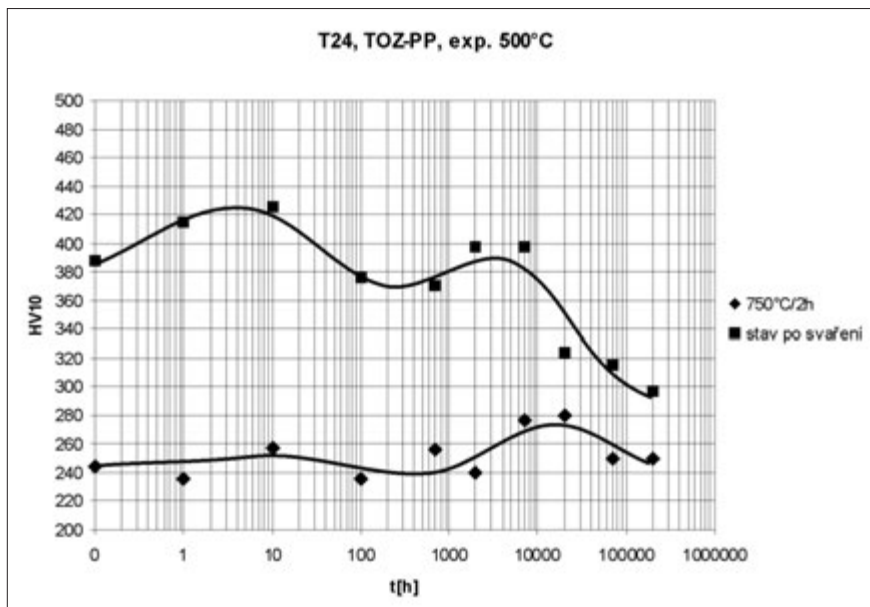
V současné době nefunguje uspokojivě v Evropě jediná membránová stěna z oceli T24! Odborná veřejnost se pomalu přiklání k názoru, že praskání svarových spojů na membránových stěnách souvisí se sekundárním vytvzováním oceli T24.



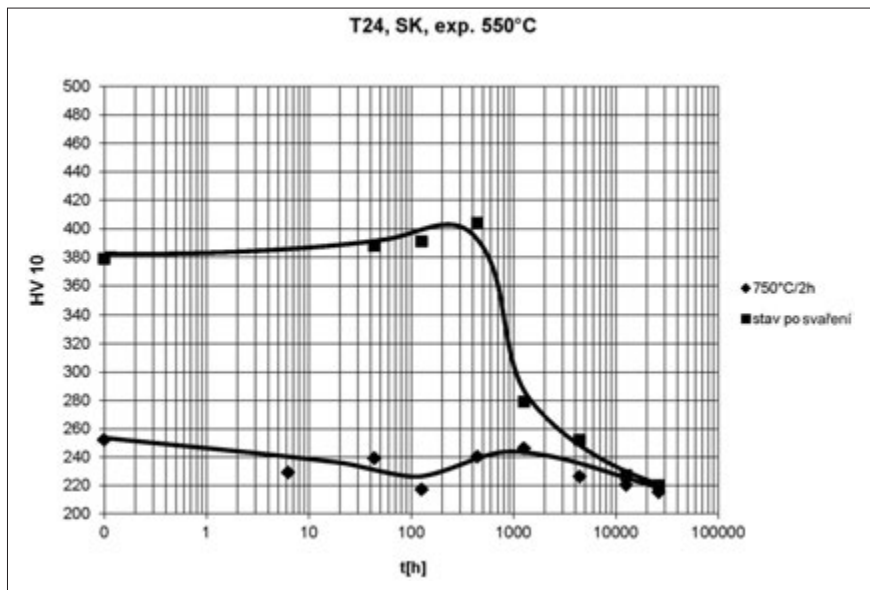
Petr Mohyla přednáší na konferenci Promatten



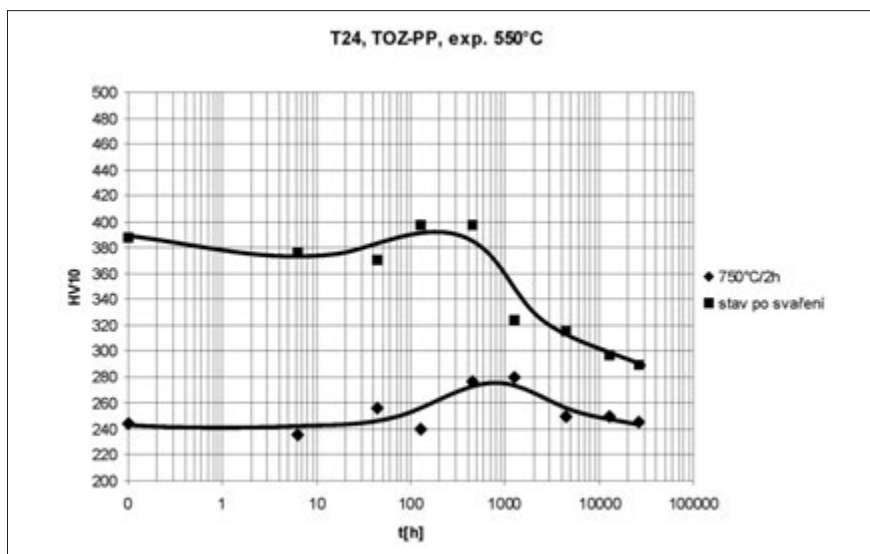
Obr. 2 – Průběh tvrdosti svarového kovu, provozní teplota 500 °C



Obr. 3 – Průběh tvrdosti pásma přehřátí TOZ, provozní teplota 500 °C



Obr. 4 – Průběh tvrdosti během teplotní expozice při 550 °C



Obr. 5 – Průběh tvrdosti během teplotní expozice při 550 °C, pásma přehřátí TOZ

## Experiment

V rámci experimentálního programu byly zhotoveny zkušební svarové spoje na deskách z oceli T24 metodou 111. Jedna část svarových spojů byla popuštěna na 750 °C, druhá část byla ponechána v nepopuštěném stavu (tzv. stav po svaření). Na připravených vzorcích byl simulován provoz při teplotě 500 °C a 550 °C a následně bylo provedeno měření tvrdosti v jednotlivých oblastech svarového spoje. Na obrázcích 2 až 5 jsou uvedeny výsledky měření tvrdosti ve formě tzv. křivek vytvrzení. Obrázek 2 nabízí srovnání průběhu tvrdosti popuštěného a nepopuštěného svarového kovu v průběhu teplotní expozice při 500 °C. Na obrázku 3 je totéž pro pásmo přehřátí tepelně ovlivněné zóny (TOZ). Obrázky 4 a 5 jsou analogické k obrázkům 2 a 3, avšak pro teplotu expozice 550 °C.

V další fázi byly na vybraných vzorcích změřeny hodnoty nárazové práce KV, resp. vrubové houževnatosti KCV. Vliv popuštění po svařování na vrubovou houževnatost tepelně ovlivněné zóny oceli T24 je patrný z obrázku 6. Z naměřených hodnot jednoznačně vyplývá, že u nepopuštěného svarového spoje dochází k výrazné ztrátě plastických vlastností. Průběh vrubové houževnatosti vykazuje minimum v oblasti maximálního vytvrzení a v oblasti poklesu tvrdosti má naopak stoupající tendenci viz obr. 7.

## Diskuse dosažených výsledků

Tvar křivek vytvrzení ve svarovém kovu a v pásmu přehřátí je podobný. Nejdříve dochází k nárůstu tvrdosti, který lze označit jako tzv. sekundární vytvrzení a poté následuje pokles tvrdosti. Doba, ve které dochází k maximálnímu vytvrzení, závisí na teplotě expozice, což je v souladu s prací [5]. Z křivek průběhu tvrdosti je patrné, že u svarů, které nebyly po svaření popuštěny, dochází ke značnému vytvrzení v relativně krátkém čase. Při 550 °C je maximum tvrdosti pozorováno v čase 450 hodin. Při delších časech (nad 1 000 hodin) již tvrdost klesá.

Maximum tvrdosti bylo naměřeno ve svarovém kovu, a to 460 HV10. V pásmu přehřátí TOZ bylo naměřeno nejvíce 420 HV10. Hodnoty tvrdosti nepopuštěných svarových spojů jsou vyšší, než dovoluje norma ČSN EN ISO 15614-1. Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování [3]. Naměřené hodnoty ukazují na přítomnost sekundárního vytvrzování svarových spojů oceli T24. Mechanismus vytvrzování je v souladu s pracemi /1, 2/ dán procesy dodatečné precipitace disperzních částic MX.

Z křivek průběhu houževnatosti vyplývá markantní rozdíl v úrovni hodnot vrubové houževnatosti u svarového spoje popuštěného a nepopuštěného. Zatímco v popuštěném stavu se vrubová houževnatost pásma přehřátí TOZ pohybuje v průběhu vysokoteplotní expozice kolem 180 J/cm<sup>2</sup> (při zkušební teplotě 20 °C), v nepopuštěném stavu jsou hodnoty KCV velmi nízké, kolem 20 J/cm<sup>2</sup>. Mezi křivkami tvrdosti a houževnatosti lze vypočítat určitou vzájemnou souvislost. Oblast maxima tvrdosti, tj. oblast sekundárního vytvrzení, zhruba



**FLASH STEEL  
POWER**



## TECHNOLOGICKÉ CELKY - HUTNÍ MATERIÁL PRO ENERGETIKU STROJNÍ POLOTOVARY A DÍLY - MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

### Technologické celky pro energetický a chemický průmysl

Parovody, tlakové nádoby,  
výměníky, plynová potrubí,  
spalinovody

### Hutní materiál pro energetický a chemický průmysl

Ocelové trubky, rovné trasy,  
ohyby, armatury, redukce,  
T-kusy, příruby, plechy, výpalky,  
ploché a kruhové tyče

Flash Steel Power, a.s., Martinovská 3168/48, 723 00 Ostrava, tel.: +420 596 958 542, info@flashsteel.cz, www.flashsteel.cz

*JSP Měření a regulace*



**Komplexní dodávky SKŘ „na klíč“  
a úplný sortiment instrumentace**

**Měření teploty v průmyslových  
podmínkách**

**Moderní systémy analýzy  
vody a páry**



Teplota



Tlak



Kalibrace



Analýza



Hladina



Průtok



Armatury

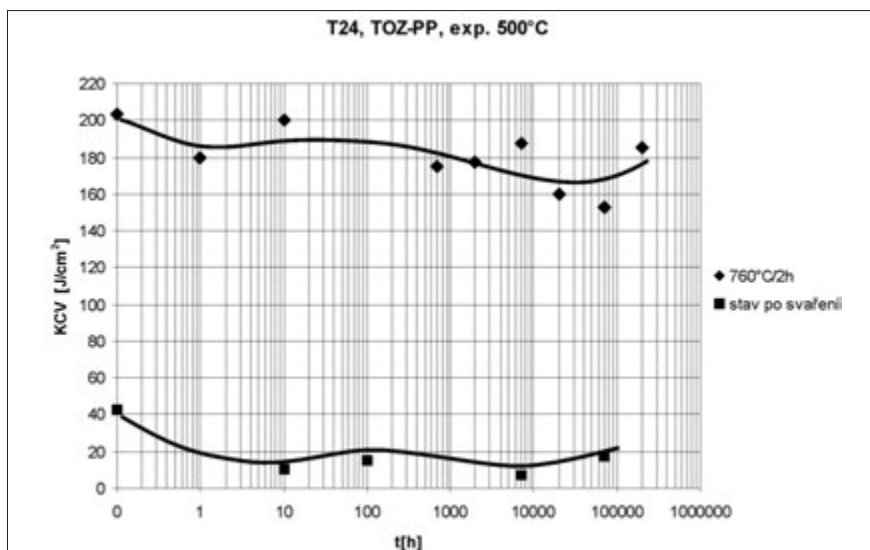


Převodníky

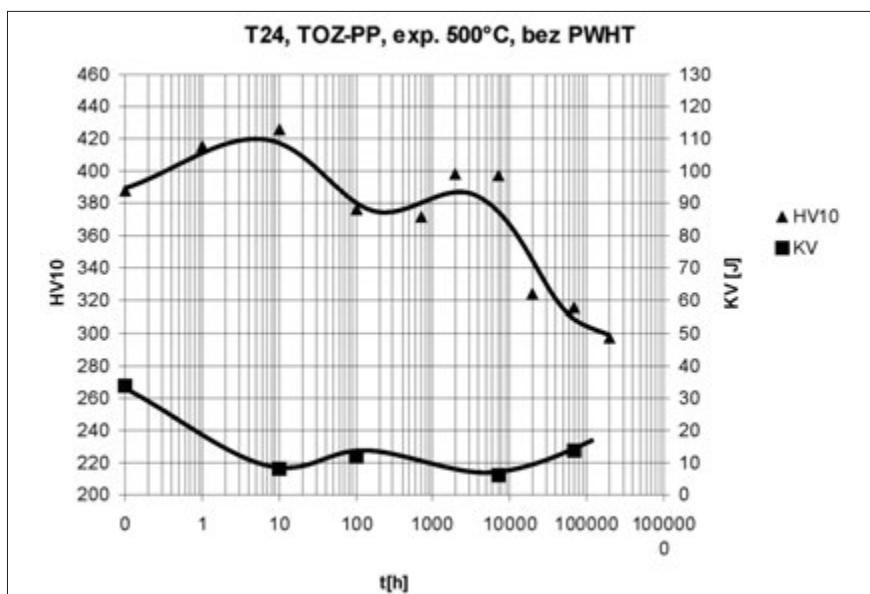


Přístroje

www.jsp.cz



Obr. 6 – Průběh vrubové houževnatosti pásma přehřátí TOZ při provozní teplotě 500 °C



Obr. 7 – Srovnání průběhu hodnot nárazové práce a tvrdosti během dlouhodobé teplotní expozice při 500 °C, nepopuštěné pásma přehřátí TOZ

odpovídá oblasti minima houževnatosti. Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že s pozorovaným sekundárním vytvrzováním nepopuštěných svarových spojů oceli T24 souvisí pokles vrubové houževnatosti.

#### Závěr

U svarových spojů nízkolegovaných žárovečných ocelí zpevněných disperzí částic MX dochází během dlouhodobé teplotní expozice za zvýšených teplot k procesu sekundárního vytvrzování.

Velikost tohoto vytvrzení závisí na teplotě popouštění po svařování a době expozice. Z naměřených výsledků vyplývá, že u nepopuštěných svarových spojů dochází během následné dlouhodobé expozice při zvýšených teplotách k vytvrzení a k poklesu plastických vlastností. Na základě dosažených výsledků je možno konstatovat, že popouštění svarových spojů oceli T24 má velký význam především z hlediska dosažení dostatečných plastických vlastností. Vynechání popouštění po svařování při výrobě membránových stěn z oceli T24 se jeví jako problematické a v souvislosti s dosavadními provozními zkušenostmi dokonce až nebezpečné. Pro dosažení přípustné tvrdosti a dostatečné houževnatosti svarových spojů je možno doporučit teplotu popouštění 750 °C.

#### LITERATURA:

- [1] Mohyla, P. Změny mechanických vlastností svarových spojů oceli 15 128 při dlouhodobé teplotní expozici v podcreepové oblasti, Sborník vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, 2001, část 2, str. 31
- [2] HLAVATÝ, J., KREJČÍ, L., MARŠÍKOVÁ, M. Svařitelnost ocelí T23 a T24. In: sborník přednášek Svařovací den, 17-18.6.2010 Hněvkovice. VŠB – TU Ostrava 2010, s. 30-33. ISBN: 978-80-248-2248-8
- [3] ČSN EN ISO 15614-1 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu (05 0313), Český normalizační institut, 2005
- [4] 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
- [5] VIŇÁŠ, J.: Volba vhodných přídatných materiálů pro renováciu funkčných povrchov namáhaných vysokými tlakmi. In. Acta Mechanica Slovaca – Pro-tech-ma 2004,2-B/2004 roč. 8. TU Košice s. 465-470., ISSN 1335-2393

**Ing. Petr Mohyla, Ph.D.,  
Ing. Jiří Zapletal**  
Flash Steel Power, a.s.,  
p.mohyla@flashsteel.cz

#### Is T24 steel suitable for membrane walls in USC boilers?

This paper deals with secondary hardening of welded joints of steel T24 during long term exposure in operating temperature range. Observed hardening is related to secondary precipitation of dispersion particles. Steel T24 is already used for membrane water walls of ultra super critical boilers. There is an effort to leave out post weld heat treatment in the production of membrane water walls (MWW). Presented experimental results shows, that extend of secondary hardening depends on application of PWHT. Not tempered welded joints show an unallowable increase of hardness and decrease of toughness during exposure at working temperature.

#### Подходит ли сталь T24 для мембранной стенки USC котла?

В настоящей статье рассматривается вторичное затвердевание сварных соединений стали T24 при их длительной выдержке под воздействием рабочих температур. Наблюдаемое затвердевание связано с вторичным соединением дисперсных частиц. Сталь T24 уже используется для мембранных стен USC котлов. Существуют попытки отказаться от термической обработки после сварки в производстве MWW. Представленные экспериментальные результаты показывают, что скорость вторичного затвердевания зависит от применения термообработки (PWHT). У не прошедших термообработку соединительных швов при воздействии рабочих температур неприемлемо повышается жесткость, что приводит к снижению прочности соединений.