

# Vliv výchozí deformace na strukturní a mechanické vlastnosti oceli P92

Mezi nejčastěji používané technologické úpravy materiálů patří jeho ohýbání. Touto operací však dochází k vzniku plastických deformací materiálu, které ovlivňují výslednou životnost ohýbané komponenty. Tento příspěvek se proto zabývá vlivem výchozí deformace oceli P92 (pro nadkritické parovody) na její strukturní a mechanické vlastnosti s ohledem na předpokládanou životnost parovodů.

## Úvod

Řešení problematiky ohýbání nové martenzitické žáropevné oceli P92 bylo zaměřeno na určení vlivu výchozí deformace na výslednou životnost této oceli. Studovány byly následující experimentální ohyby [1]:

- A. P92/10 mm (výrobce Alstom s.r.o.): trubka OD 44,5 × 10 mm, ohyb 180°
  - varianta A – bez TZ, poloměr ohybu R153
  - varianta B – předohyb za tepla, R80
  - varianta C – úzký (lisovaný) ohyb za tepla, R30, s tepelným zpracováním (TZ): 1 060°C/20 min + 775°C/70 min
- B. P92/39 mm (výrobce MODŘANY Power, a.s.): trubka OD 350 × 39 mm, ohyb 90°, R1050 za tepla (pomocí indukčního ohřevu 920 až 1 000°C) rychlostí 7 mm/min s TZ: normalizace 1 050°C/1 h + popuštění 775°C/140 min/pec
- C. P92/94 mm (výrobce MODŘANY Power, a.s.): trubka OD 548 × 94 mm, ohyb 90°, R2500 za tepla (pomocí indukčního ohřevu 1 000 až 1 050°C) rychlostí 3 mm/min s TZ: bezprostředně po ohybu 700°C/2 h + normalizace 1 050°C/4 h/ voda + popuštění 770°C/5 h/pec

Z důvodu anizotropie vlastností a nehomogeneity rozložení deformace v průřezu ohýbané trubky byla pro získání požadovaných poznatků využita kombinace analýzy numerickými metodami (MKP) s mechanickými (creepovými) zkouškami a následným mikrostrukturním rozbohem jednotlivých partií ohýbaných trubek.

## Numerické simulace metodou MKP

Pro popis experimentálního ohybu P92/39 mm byl vytvořen zjednodušený analytický model chování při ohybu a ten byl následně porovnán s MKP výpočtem. Z celého kolena byla modelována pouze část odpovídající úhlu 3° a pro tuto část bylo předepsáno takové natočení krajních průřezů, aby po uvolnění oba krajní průřezy svíraly úhel 3° a střední poloměr kolena zůstal R 1 050 mm. V takovém modelu je tedy zabráněno deplanaci příčných průřezů, je však umožněna jejich ovalizace.

Po uvolnění kolena byl proveden výpočet pole redukovaného napětí podle hypotézy HMM a pole axiálního napětí  $\sigma_{yy}$  ve vzorku uprostřed ohýbané části, resp. na okraji ohýbané části kolena po odříznutí rovných konců. Hodnoty meze kluzu pro výpočet byly zvoleny 72 MPa (minimální předpokládaná hodnota při ohýbání) a 205 MPa (maximální předpokládaná hodnota při ohýbání). Výpočet ukázal, že zbytková napjatost po tváření a následném uvolnění je soustředěna jen v poměrně úzké oblasti kolem neutrální osy průřezu, v níž se axiální napjatost mění z tlakové na tahovou. Navíc z provedených výpočtů

vyplývá, že v oblasti vlastního oblouku kolena je zbytková napjatost prakticky nezávislá na mezi kluzu materiálu pro fázi odlehčení. Mez kluzu materiálu ve fázi odlehčení má vliv na zbytkovou napjatost pouze na okraji ohýbané části kolena po odříznutí rovných konců. Ve fázi uvolnění již k pozorovatelné plastizaci kolena nedochází.

Dále byla provedena MKP simulace napětí v kolenu VT parovodu z oceli P92 (P92/94 mm) na základě nominálních a reálných tlouštěk získaných z experimentálního měření reálného ohybu trubky. Koleno bylo namodelováno metodou konečných prvků v systému PMD, a to v provedení s konstantní nominální tloušťkou stěny a v provedení se skutečně změřenou tloušťkou stěny. Koleno bylo zatíženo vnitřním přetlakem 30 MPa a jeho okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby popisovaly ideální stav, kdy je jednomu konci kolena umožněna volná deformace a je omezeno pouze natočení v předpokládaném místě napojení na další parovod. U reálného potrubního systému budou však podmínky z pohledu velikosti výsledného napětí vždy výrazně horší.

Jako u ohybu P92/39 mm byla i pro P92/94 mm provedena simulace napětí a vypočteno pole redukovaného napětí na vnitřním povrchu kolena, zatíženého vnitřním přetlakem 30 MPa. Z izoploch redukovaného napětí byl patrný poměrně výrazný dopad změny tlouštěk po obvodu daný přetvořením. Porovnáním rozdílů velikosti redukovaného napětí po celém obvodu na vnitřním povrchu v řezu 45°, plynoucího pouze ze zeslabení tloušťky stěny, je tak na tažené straně 16 MPa, což koresponduje s našimi experimentálními výsledky na reálném ohybu.

## Mechanické zkoušky

Trubky po ohnutí byly podrobeny tahovým zkouškám, zkoušce rázem v ohybu a creepovým zkouškám. Výsledky těchto zkoušek ukázaly, že ocel T/P92 má po ohnutí velmi podobné mechanické vlastnosti jako před ohýbáním. Po 5 000 hodin izotermické výdrže při teplotě 650°C dochází k mírnému poklesu pevnostních vlastností a hodnoty vrubové houževnatosti.

V případě ohybu tlustostěnné trubky P92/94 mm však byly hodnoty výchozích (po TZ po svaření) mechanických vlastností, a to zejména vrubové houževnatosti na spodní hranici přípustnosti. Na základě těchto výsledků byla ověřena možnost TZ již jednou tepelně zpracovaného ohybu. Vzorky k TZ byly odebrány z vnější tažené části středu ohybu, která vykazovala nejnižší hodnoty. Volba TZ:

- normalizace: 940°C nebo 1 050°C/2 h/voda
- popuštění: 750°C nebo 770°C nebo 780°C/2 h/pec

Po novém TZ byly provedeny zkoušky tahem, rázem a měření tvrdosti při teplotě 20°C. Ze srovnání

zjištěných mechanických vlastností bylo patrné, že nové TZ (pro teploty nad 750°C) ovlivňuje prakticky pouze hodnoty vrubové houževnatosti, přičemž nejvyšších hodnot bylo dosaženo při popouštěcí teplotě 770°C. Naopak pevnostní charakteristiky dosahují nejvyšších hodnot pro popouštěcí teplotu 750°C a zároveň se zde projevuje volba teploty austenitizace.

Kromě tahových zkoušek a zkoušek vrubové houževnatosti byly v laboratořích Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v.v.i. v Brně provedeny také zkoušky tečení na ohybu trubky P92/39 mm [2]. Creepové vzorky byly odebrány z tažené, středové (neutrální) a tlačené části. Názorné porovnání creepového chování vzorků oceli P92 odebraných z výše uvedených částí ohýbané trubky přináší creepové křivky (časové závislosti creepového prodloužení) uvedené na obr. 1 a 2. Z obou obrázků vyplývá, že za zvolených creepových podmínek vykazují nejkratší dobu do lomu (nejmenší creepovou životnost) vzorky odebrané z tlačené části trubky, zatímco vzorky ze středové (neutrální) části trubky leží v rozptylovém pásmu vzorků z tažené části. Přesto s ohledem na rozptyl, který je creepovým zkouškám vlastní, nejsou rozdíly v chování jednotlivých vzorků z různých částí trubky významně rozdílné.

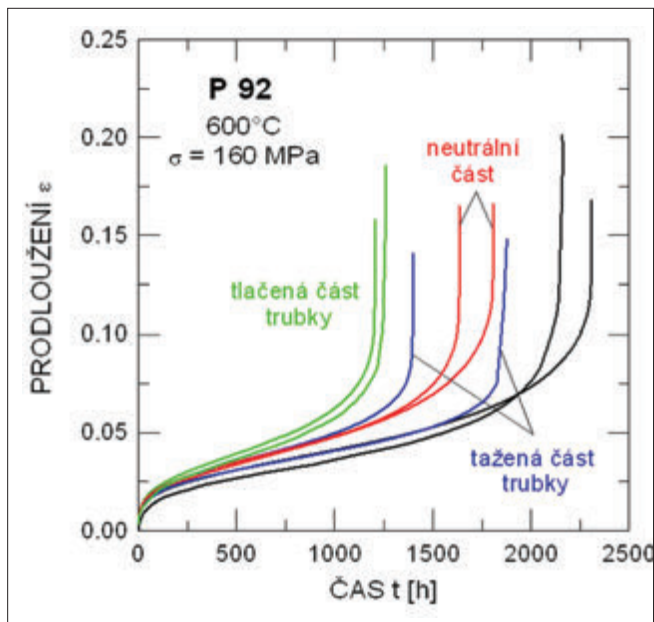
## Mikrostrukturní rozbor

Mikrostruktura oceli T/P92 ve výchozím stavu po ohýbání u všech tří rozměrů, tj. OD 44,5 × 10 mm, OD 350 × 39 mm a OD 528 × 94 mm je tvořena popuštěným martenzitem s karbidickými částicemi typu  $M_{23}C_6$ , které se nachází na hranicích martenzitických desek a s disperzí karbonitridických částic typu MX ve feritické matici. Tvrdosti výchozích stavů trubek před ohnutím dosahují hodnoty 230 až 240 HV10. V závislosti na technologii ohybu se při ohýbání tvrdost celého průřezu trubky mění. V případě tenkostěnné trubky P92/39 mm je tvrdost před i po ohybu v celém průřezu prakticky stejná. Naopak u obou tlustostěnných trubek P92/10 mm (ohyb za studena) a P92/94 mm je patrný nárůst tvrdosti v tažené a tlačené části průřezu trubky (cca o 30 HV10).

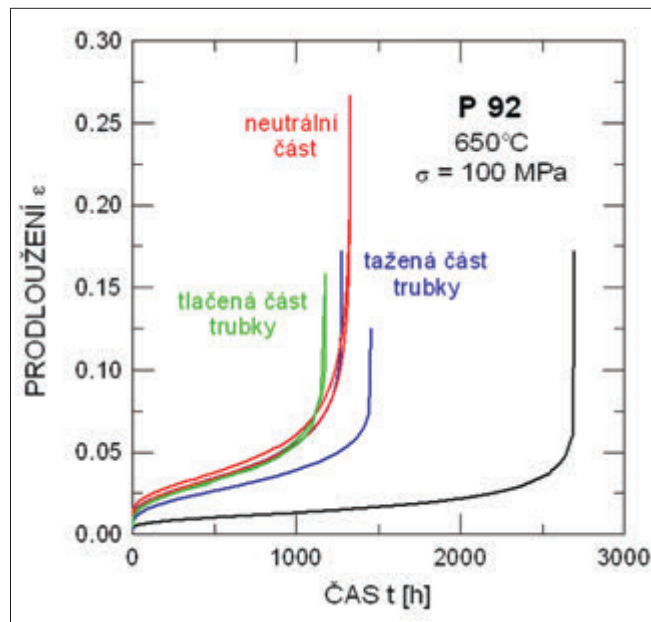
Po dlouhodobé teplotní expozici (více než 10 000 hodin při 650°C) karbidické částice na hranicích martenzitických desek hrubnou, střední mezičásticová vzdálenost a vzdálenost mezi martenzitickými deskami roste a dochází také k postupné precipitaci a růstu Lavesovy fáze v matici. Fáze MX je stabilní. Tvrdost ohnutých trubek postupně klesá na hodnotu neohýbané oceli (po 5 000 hodinách se tvrdost neohnuté a ohnuté trubky P92/10 mm liší pouze o cca 10 HV10).

## Závěr

Vliv procesu ohýbání se nejvíce projeví na žáropevnosti. Z obr. 1 a 2 je patrné, že obecně



Obr. 1 – Porovnání průběhů creepových křivek oceli P92 z různých částí ohnuté trubky OD 350 x 39 mm (černé křivky odpovídají neohnuté trubce). Teplota 600°C, napětí 160 MPa



Obr. 2 – Porovnání průběhů creepových křivek oceli P92 z různých částí ohnuté trubky OD 350 x 39 mm (černé křivky odpovídají neohnuté trubce). Teplota 650°C, napětí 100 MPa

vzorky z ohybu trubky vykazují kratší životnost než vzorky z části trubky bez ohybu. Dále je patrné, že creepové expozice při teplotě 600 a 650°C (vzhledem k různým hodnotám aplikovaného tahového napětí) vedou zhruba ke stejnému trvání. Rozdíl mezi ohýbanými částmi trubky a neohýbanou trubkou je však podstatnější při teplotě 650°C. Jednou z možností vysvětlit tento rozdíl je představa o výraznějším působení difúzní podmiňovaných procesů (např. zotavení a rekrystalizace či jiných strukturálních procesů [3], jejichž kinetika bude nepoměrně rychlejší při této vyšší teplotě než při teplotě 600°C). Uvedená představa však nezbytně vyžaduje oporu v provedení systematického mikrostrukturálního rozboru exponovaných creepových vzorků. Opodstatněnost provedení takové studie lze zdůvodnit předpokladem, že právě v provozních podmínkách zatěžování trubky lze očekávat výraznější či zcela dominující působení difúzních procesů, a tudíž relativně krátkodobé creepové zkoušky realizované v oblasti dominujících dislokačních deformačních mechanismů [3] nemusí poskytnout relevantní informace o chování zkoumané trubky v provozu.

Pro úplnost je třeba dodat, že anisotropie vlastností podél průřezu ohýbané trubky může

rozdílně ovlivnit i kinetiku dalších degradačních procesů, např. vysokoteplotní oxidace, koroze či rozvoj různých forem porušování (creepová kavitace, rozvoj mikrotrhlin či nukleaci a růst magistralní trhliny [4]). Těmto jevům je nutno věnovat bližší pozornost.

#### Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci řešení projektu č. 2A-1TP1/057 programu „Trvalá prosperita“ a za podpory Technologické agentury České republiky v rámci řešení projektu č. TA02010260 programu ALFA.

#### Literatura

- [1] Čmakal, J. – Svobodová, M. – Tůmová, D.: Řešení materiálových a technologických inovací pro energetická a chemická zařízení nové generace pracující za vysokých teplot (VI). Závěrečná zpráva řešení projektu č. 2A-1TP1/057. [Zpráva UJP 1453] UJP PRAHA a.s., Praha, prosinec 2011, 86 s.
- [2] Kuchařová, K. – Sklenička, V. – Svoboda,

- M. – Kvapilová, M.: Studium degradace creepových vlastností v závislosti na stupni deformace zkoumaných materiálů a na podmínkách svařování u přechodových svarů. Závěrečná zpráva řešení projektu č. 2A-1TP1/057. [Zpráva ÚFM AV ČR] ÚFM AV ČR, v.v.i., Brno, říjen 2011, 50 s.
- [3] Sklenička, V. – Kuchařová, K. – Svoboda, M. – Kloc, L. – Buršík, J. – Kroupa, A.: Long-term creep behaviour of 9-12%Cr power plant steels. *Materials Characterization* 51 (2003), pp. 35-48.
  - [4] Sklenička, V. – Saxl, I. – Čadek, J.: Mezikrystalový lom při vysokoteplotním crepu kovů a slitin. [Studie ČSAV č. 8] Academia Praha, 1977.

Marie Svobodová,  
Josef Čmakal,  
Ladislav Horváth,  
UJP PRAHA a.s.

Václav Sklenička,  
Ústav fyziky materiálů AV ČR,  
v.v.i., Brno

#### Influence of Initial Deformation on Structure and Mechanical Properties of P92 Steel

Bending of materials belongs to the most frequently used technological procedures. However, this operation brings a plastic deformation into the material, which affects the final service life-time of the bended component. Therefore, this paper deals with an influence of initial deformation of P92 steel (for super-critical pipelines) on its structural and mechanical properties with regard to the expected life of pipelines.

#### Влияние исходной деформации на структурные и механические свойства стали P92

К наиболее часто используемым технологическим обработкам материала относится гибка. Но при этой операции происходит возникновение пластических деформаций материала, которые влияют на последующий срок службы огибаемой детали. Эта статья посвящена влиянию исходной деформации стали P92 (для надкритических пароводов), на её структурные и механические свойства с учетом предполагаемых сроков службы паровода.