

# Oponentský posudek

doktorská disertace v oboru Materiálové inženýrství

Ing. Michal Junek, IWE

## ***Posuzování životnosti svarových spojů VT parovodů z martenzitických ocelí v podmínkách creepového poškození***

Obor doktorského studia: Materiálové inženýrství  
Předložená disertace: ČVUT v Praze, Fakulta strojního inženýrství, Ústav  
materiálového inženýrství  
Školitel: Doc. Ing. Jirí Janovec, CSc. - ČVUT v Praze, FS  
Oponent: Doc. RNDr. Josef Kasl, CSc. – VZÚ Plzeň

---

Práce je zaměřena na výzkum vlastností homogenních a heterogenních svarových spojů potrubí z ocelí P91 a P92 zhotovených technologií orbitálního svařování do úzkého úkosu zejména s ohledem na jejich odolnost vůči creepové degradaci. Potrubí jsou určena pro výrobu vysokoteplotních parovodů na klasických tepelných elektrárnách pracujících v nadkritických podmínkách páry. Obě ocele jsou dlouhodobě intenzivně studovány na celém světě. Zatímco základní materiály jsou z hlediska tečení podrobně popsány, data o chování svarů vyrobených konkrétními technologiemi jsou k dispozici daleko méně. Přitom to jsou právě místa svarových spojů, která představují kritický článek z hlediska výskytu havárií a dosažené životnosti dílů energetických zařízení. Zvolené téma práce je proto potřeba hodnotit jako aktuální a vysoce potřebné pro rozvoj našeho energetického průmyslu.

Práce je dosti rozsáhlá a košatá. Má celkem 160 stran, z čehož vlastní práce zaujímá prvních 125 stran, zbytek tvoří citovaná literatura (110 prací), autorovy vlastní práce k dané problematice (20 příspěvků), seznam zkratk a symbolů seznam tabulek (24), seznam obrázků (99) a tři přílohy. Je standardně členěna. Po obecném úvodu následuje teoretická část, po ní jsou v třetí kapitole specifikovány cíle disertační práce a v další části následuje popis použitých metodik a materiálů. Pátá kapitola je věnována popisu získaných experimentálních výsledků, šestá se zabývá diskusí a závěrečný závěr shrnuje získané výsledky. Práce je zpracována logicky a přehledně. Zejména bych ocenil diskusi, v níž se doktorand zevrubně výsledky zabývá a uvádí jejich interpretaci a vzájemné souvislosti.

Následující dílčí části oponentského posudku hodnotí disertaci podle obdrženého pokynu pro jeho vypracování.

### **1. Dosažení v disertaci stanoveného cíle**

Čtyři cíle jsou jasně formulovány v kapitole 3:

- Stanovit vliv orbitálního svařování na mikrostrukturní stabilitu 9% Cr feriticko-martenzitických žárupevných ocelí.
- Ověřit vliv svařování na změny mechanických a creepových vlastností především z hlediska aplikace orbitálního svařování
- Posoudit možnost semidestruktivních zkoušek při použití mikro a mini-vzorků na diagnostické hodnocení stavu svarových komponent vysoko parametrických elektráren
- Uvést možnosti prodloužení projektované životnosti vysoko parametrických elektráren z  $2,5 \times 10^3$  h na limitní hodnotu  $3,5 \times 10^5$  h.

Prvnímu a druhému cíli je věnována větší část práce. Na základě podrobných rozborů mechanických vlastností a mikrostruktury orbitalových svarů po degračních testech dospívá autor k závěru, že tato svařovací technologie vede k dosažení homogenní mikrostruktury v dané pozici po výšce svaru (kořen, střed a koruna) a svařovací poloze. Dále k tomu, že mikrostruktura je v rámci v práci použitých testovacích podmínek relativně stabilní. Výsledky ukazují mírně příznivější nebo srovnatelné dosažené mechanické a křehkolomové vlastnosti a odolnost proti tečení ve srovnání s výsledky z literatury pro svarové spoje provedené ručním svařováním. Vzhledem k tomu, že orbitální svařování je ekonomicky příznivější, autor doporučuje jeho aplikaci.

Velice cenná je část práce věnovaná použití mini a mikro-vzorků pro hodnocení aktuálních hodnot mechanických vlastností ve vybraných částech svarového spoje s přesahem do praktického hodnocení současného stavu a potažmo zbytkové životnosti provozovaných dílů. Byly stanoveny korelační rovnice mezi jednotlivými parametry.

Naplnění čtvrtého cíle, možnost hodnocení prodloužení projektové životnosti parovodů, je třeba ocenit spíše z hlediska z hlediska didaktického. Jedná se o problematiku komplexní zahrnující celou řadu různých vlivů. V současných podmínkách provozování elektráren je kromě creepové degradace a vysokoteplotní oxidace nutno vzít v úvahu souběžně působící degradaci únavou materiálu. Ale i při hypotetickém uvážení pouze tečení je předpoklad, že využití Larson-Millerových parametrických rovnic na základě dat získaných pro čistě teplotní zatížení při teplotách vysoko nad teplotou pracovní a pro relativně krátké časy dosti nerealistické.

Doktorand vykonal ve své práci velké množství smysluplné práce, díky níž získal značné množství informací, které dokázal vyhodnotit a interpretovat. Vcelku tedy považují naplnění cílů nejen za dosažené, ale v úhrnu dosažených výsledků za překročené.

## **2. Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky**

Literatura k dané problematice creepového chování martenzitických žárupevných ocelí je prakticky bezbřehá. Autor se v teoretické části opírá a cca 100 literárních citací (kupodivu mezi nimi není Vodárkova monografie věnovaná studovaným ocelím). K rozboru lze mít dílčí výhrady (např. absence uvedení dalších fenomenologických modelů popisu creepových křivek, jiných parametrů než parametr Larson-Millera, popis struktury vícehouseňkových svarů), nicméně lze konstatovat, že autor si v teoretické části vytvořil solidní zázemí pro popis a interpretaci svých výsledků. Doktorand tak prokázal, že je schopen se orientovat v literatuře a najít si a zpracovat zásadní informace.

## **3. Teoretický přínos disertační práce**

V práci byly vypracovány a odzkoušeny postupy pro aplikaci netradičních metod zkoušení mini- a mikro-vzorků a matematického simulování chování svarových spojů potrubí vyrobených z žárupevných Cr-ocelí při teplotní a creepové degradaci. Odběry miniaturních vzorků, cíleně polohovaných z jednotlivých oblastí svarového spoje, a stanovení jejich mechanických a strukturních vlastností významně prohloubily naše znalosti o stavbě a chování těchto technologických uzlů.

## **4. Praktický přínos disertační práce**

Za hlavní praktický přínos práce považují získání dat o vlastnostech a chování svarových spojů žárupevných Cr-ocelí vyrobených technologií orbitalového svařování. Dále bylo zpracováno velké množství korelačních vztahů mezi různými parametry a ověřena

možnost semidestruktivního zkoušení parovodů na elektrárnách za využití miniaturních zkušebních vzorků. To umožní spolehlivější testování aktuálního stavu potrubí resp. jeho zbytkové životnosti.

## **5. Vhodnost použitých metod řešení**

Pro dosažení cílů práce doktorand zvolil vhodné metody nejen dostupné na svém pracovišti, ale využil i technik dalších pracovišť spolupracujících na řešení problematiky. Základní experimenty obsahovaly jednak žíhací zkoušky, jednak creepové zkoušky vzorků homogenních i heterogenních svarových spojů z ocelí PP1 a P92. Interpretaci poněkud komplikoval fakt, že heterogenní svary byly vyrobeny ze základních materiálů od jiných dodavatelů než homogenní svarové spoje. Mikrostruktura zkušebních vzorků byla sledována standardními způsoby zejména pomocí světelné mikroskopie a řádkovací elektronové mikroskopie a doplňkově i transmisní elektronové mikroskopie tenkých fólií. Navíc byla provedena stereologická hodnocení částic sekundárních fází. Byly měřeny mechanické vlastnosti, vrubová houževnatost a profily tvrdosti. Tyto vlastnosti byly sledovány nejen na standardních zkušebních tyčích, ale na mikro- a mini-vzorcích. Byla provedena matematická simulace svarových spojů a jejich vývoje metodou konečných prvků. Pro jeho potřeby byly fyzikálně simulovány a měřeny vlastnosti jednotlivých oblastí svarového spoje a změřeny teplotní cykly v nich. Celý tento soubor experimentů a hodnocení představují nadstandardní aktivity v rámci disertační práce a je třeba velmi ocenit jak jejich rozsah, tak i kvalitu provedení.

## **6. Způsob, jak byly použité metody aplikovány**

Zvolené metody byly použity s přehledem a účelně a umožnily získat velký objem cenných informací.

K práci mám následující hlavní obecné připomínky/doporučení:

Testovací podmínky, zejména u žíhacích testů, byly za vysokých teplot a relativně krátkých dob. Rovněž ukončené creepové zkoušky byly pro krátké doby do lomu – cca 10 000 hodin (z textu práce není jasné, zda další zkoušky pokračují nebo byly přerušeny). Na základě těchto dat je problematické pomocí parametrických rovnic stanovovat chování materiálu po dlouhých dobách za provozních podmínek (teplota, napětí). Extrapolace výsledků z krátkodobých creepových testů (za vyšších napětí) na hodnoty pro dlouhé doby (při nižších napětích) je ošidné díky změnám působících degradačních mechanismů.

Mikrostrukturní popis byl soustředěn zejména na základní metalografické parametry a na kinetiku částic sekundárních fází. Klíčový je však nakonec vždy stav a změny dislokační substruktury. Je trochu škoda, že nebyly provedeny rozsáhlejší rozbory pomocí TEM.

Odlišení částic Lavesovy fáze a karbidů  $M_{23}C_6$  na základě obrazů získaných pomocí sekundárních a odražených elektronů ve (standardních) řádkovacích elektronových mikroskopech může být zkruseno tím, že nejmenší částice Lavesovy fáze nejsou zjistitelné.

Zcela ovšem chápu, že autor byl výrazně omezen časovými a zřejmě i finančními možnostmi na experimenty, a tyto poznámky je třeba chápat ne jako kritiku autora a práce, ale o obecné vyjádření k případnému dalšímu pokračování prací.

## **7. Prokázal doktorand odpovídající znalosti v daném oboru.**

Doktorand prokázal, že je schopen pracovat s literaturou a získané poznatky aktivně uplatnit při výzkumné práci. Studovanou problematiku popisu struktury a vlastností svarových spojů martenzitických Cr a jejich creepového pochopil a zvládl jak realizaci experimentů, tak vyhodnocení získaných výsledků a jejich interpretaci. To potvrzuje i 20 publikací (z toho 4 impaktované) doktoranda v dané problematice.

## 8. Formální úroveň práce

Práce je, co se týče její struktury, dobře zpracována. Nechybí přehled zkratk a symbolů, seznam tabulek a obrázků. Vhodné je soustředění rozsáhlejších tabulek s přehledy kvantitativních výsledků do příloh. Některé grafy a obrázky vykazují horší rozlišení. V textu se vyskytuje relativně hodně překlepů a chybějících znaků a neobratných formulací (např. u popisu obr. 1 mění příčinu a následek). Najde se i špatné číslování obrázků a stejné popisky v řádcích tabulky. Práce není prostá ani formálních chyb (např. v označení ocelí norem ČSN). Nejednotné je i používání některých termínů (např. difuzní – difúzní, martenzitická latka – martenzitická lat, svařovací kov – svarový kov). U některých uvedených zjevně cizích výsledků chybí citace. Tyto skutečnosti bohužel poněkud snižují hodnotu této kvalitní práce.

Protože osnova explicitně nepočítá s dotazy a připomínka oponenta, uvádím je na tomto místě. Rozsah a pestrost aktivit a zajímavé výsledky vyvolávají mnoho dotazů, z nichž vzhledem k omezenému časovému prostoru vybírám do obecné diskuse k práci jen následující:

- 1) Str. 11, popište podrobněji vliv boru na vlastnosti a chování žárovevých ocelí.
- 2) Str. 17, může precipitovat Lavesova fáze i během výroby oceli?
- 3) Str. 20, autor rozděluje TOO na tři zóny, nejvzdálenější od linie ztavení je pásmo částečné překrystalizace (PČP), které je rozděleno na interkritickou oblast s částečnou překrystalizací a vyžíhanou oblast. Může být tato vyžíhaná oblast součástí PSČ (když v ní k žádné překrystalizaci nedochází? V celé práci jsem postrádal kvalitní snímky makrostruktury TOO ve s rozdělením na jednotlivé oblasti. Mohou být ukázány během prezentace práce.
- 4) Str. 53, při popisu mikrostruktury TOO svarových spojů se používá pojmů velikost feritického zrna, velikost primárního austenitického zrna. Vysvětlete, jaké hranice zrn pozorujeme v jednotlivých částech TOO. Je pojem primární austenitické zrno správný?
- 5) Str. 101 (i jinde), autor používá ke spojení teploty a doby do lomu do jedné proměnné Larson-Millerův parametr. Konstanty (vzhledem k různým aktivačním energiím) volí na základě literárních údajů 18,2 a 30,0 pro žíhací experimenty resp. creepové zkoušky. Jaké jejich hodnoty vycházejí pro v práci naměřená data? Jakými křivkami byly prokládány závislosti napětí vs. doba do lomu (obr. 67 na str. 79)? Jaký je pro obecný problém hodnocení dlouhodobého creepového chování z krátkodobých experimentálních dat?
- 6) Str. 111, jaké hodnoty creepové pevnosti byly použity pro výpočet faktoru SRF (v práci je pouze zmínka o provedení creepových zkoušek základního materiálu oceli P92 a ne o oceli P91)?
- 7) Str. 120, konstatuje se, že částice typu MX jsou stabilní a částice Z-fáze nebyla pozorována. Za jakých podmínek creepového testování je možné očekávat precipitaci Z-fáze u studovaných materiálů a podmínek expozičních a jak se to projeví na stabilitě fáze MX?

## 9. Jednoznačné vyjádření oponenta k disertaci

I přes některé výše uvedené připomínky považuji disertační práci za doklad toho, že doktorand prokázal dostatečné znalosti a schopnosti tvůrčím způsobem pracovat, interpretovat a prezentovat dosažené výsledky. **Disertační práci proto doporučuji k obhajobě.**