ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE - FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ

KATEDRA MATERIÁLŮ

Trojanova 13, 120 00 PRAHA 2

Tel.: (+420) 224 358 514
Fax : (+420) 224 358 523
E-mail : Petr.Hausild@fjfi.cvut.cz

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: **Ing. Michal Junek, IWE**

Název práce: **Posuzování životnosti svarových spojů VT parovodů z martenzitických ocelí v podmínkách creepového poškozování**

Školitel: **Doc. Ing. Jiří Janovec, CSc.**

Konzultant: **Ing. Marie Svobodová, Ph.D.**

Předkládaná dizertační práce kandidáta **Ing. Michala Junka** se zabývá vlivem technologie orbitálního svařování do úzkého úkosu (TIG) na změny mikrostruktury a mechanických vlastností 9% Cr martenzitických ocelí P91 a P92, které jsou vyvolané v průběhu teplotní degradace v podmínkách simulující dlouhodobý provoz tepelné elektrárny. Přínos této práce spadá do vysoce aktuální problematiky hodnocení životnosti parovodních systémů tepelných elektráren pracujících při nadkritických parametrech páry (tj. s vyšší účinností docílené zvýšením provozních parametrů při současném požadavku na snižování emisních limitů energetických bloků).

Orbitální svařování do úzkého úkosu je vysoce produktivní a efektivní metoda svařování, která vede ke zvýšení produktivity, kvality a opakovatelnosti procesu svařování. Tato metoda v současnosti nahrazuje metodu ručního svařování obalenou elektrodou do klasického úkosu, která vyžaduje podstatně delší časy svařování a větší množství svarového kovu. Středně legované žáropevné chromové oceli P91 a P92 jsou strukturně nestabilní, tj. v průběhu dlouhodobého provozu v nich dochází ke změnám mikrostruktury a mechanických vlastností. Tyto změny mohou výrazně ovlivňovat creepové chování a tedy celkovou životnost projektovaných energetických celků. Při svařování žáropevných martenzitických ocelí P91 a P92 navíc dochází ke vzniku několika oblastí se změněnou mikrostrukturou.

Porozumění odezvy těchto mikrostrukturních oblastí na dlouhodobou teplotní degradaci je tedy zásadní pro hodnocení životnosti svařovaných komponent tepelných elektráren, které jsou kritickými uzly energetických celků.

Cíle práce byly proto stanovené takto:

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

Práce je tematicky rozdělena na Teoretickou část, kde jsou shrnuty základní poznatky o žáropevných ocelích a jejich svarových spojích. Jsou zde přehledně uvedeny požadavky kladené na žáropevné materiály, vliv legujících prvků a svařování, zejména ocelí P91 a P92. Hlavní pozornost je věnována studiu strukturní stability v souvislosti s degradačními procesy martenzitických ocelí, ke kterým v průběhu provozování energetických bloků dochází. Zvláštní pozornost byla zaměřena na creepové porušení.

V následující kapitole Metodika je uveden podrobný přehled experimentálních metod a materiálů, které byly použity pro dosažení cílů disertační práce. Experimentální program zahrnuje celkem 3 typy orbitálních svarových spojů martenzitických ocelí, tj. homogenní svarové spoje ocelí P91 a P92 a vzájemný heterogenní svarový spoj P91/P92. Zkoušeny byly vlastnosti homogenních a heterogenních orbitálních svarových spojů ocelí P91 a P92 ve stavu po svařování a po dlouhodobém izotermickém žíhání při teplotách od 650 do 700 °C, po dobu až 30 000 h.

Experimentální část shrnuje dosažené výsledky provedených experimentů, které popisují mikrostrukturu, mechanické a creepové vlastnosti zkoumaných orbitálních svarových spojů. Bylo provedeno metalografické hodnocení svarových spojů pomocí světelné, řádkovací elektronové i transmisní elektronové mikroskopie, kvantifikace Lavesovy fáze i karbidů v různých stavech laboratorní degradace. Chemické složení částic bylo určeno pomocí EDS analýzy. Zkoušky mechanických a žáropevných vlastností svarových spojů zahrnovaly měření tvrdosti a mikrotvrdosti dle Vickerse, zkoušky tahem při pokojové a zvýšené teplotě, zkoušky rázem v ohybu a creepové zkoušky. Obzvláště kladně hodnotím simulaci jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje pomocí zařízení GLEEBLE, která vyžadovala pomoc MKP simulace a znalost fázového diagramu.

Rozborem experimentálních výsledků se zabývá autor v obsáhlé a podrobné diskusní části.

Za nejvýznamnější výsledky mikrostrukturního rozboru homogenních i heterogenních svarových spojů ocelí P91 a P92 lze považovat:

- Relativní homogenitu mikrostruktury v různých lokalitách svarových spojů (kořen, střed a koruna) ve výchozím stavu po tepelném zpracování po svaření i po krátkodobých teplotních expozicích,
- Identifikaci počátku výrazného hrubnutí mikrostruktury oceli P91 po expozici při 650 °C,
- Identifikaci masivního popuštění martenzitické struktury v celé tepelně ovlivněné oblasti a ve svarovém kovu při degradačních teplotách 675 a 700 °C,
- Prokázání hrubnutí karbidické fáze typu $M_{23}C_6$ na hranicích martenzitických latěk objemovou difúzí při všech teplotních expozicích (650, 675 a 700 °C),
- Popis precipitace a růstu Lavesovy fáze v oceli P92 při izotermické degradaci.

Výsledky mechanických zkoušek provedených po expoziční teplotě 700 °C prokázaly výrazný pokles hodnot mechanických vlastností a změnu místa lomu. Při nižších degradačních teplotách došlo pouze k nevýraznému poklesu pevnostních charakteristik. Creepové zkoušky provedené na vzorcích z různých lokalit svarového spoje nenaznačují výraznou tendenci rozdílného chování jednotlivých lokalit (koruna, kořen a střed), nebyl prokázán rozdíl v creepové životnosti při různých polohách svařování a metoda orbitálního svařování do úzkého úkosu nevykazovala nižší creepovou odolnost oproti kvalitně provedenému ručnímu svaru do klasického úkosu. Provedené simulace jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje významně přispěly k posouzení vlivu precipitace Lavesovy fáze na creepové vlastnosti.

V závěru kandidát přehledně shrnul výsledky disertační práce ve vazbě na její cíle a uvedl praktickou aplikovatelnost výsledků v provozní praxi, jakož i návrhy pro další studium dané problematiky.

Závěrem mohu konstatovat, že cíle disertační práce byly splněny. Téma práce je vysoce aktuální, získané výsledky jsou velmi cenné. Kladně také hodnotím, že disertační práce má dobrou grafickou úroveň. Předloženou disertační prací autor jasně prokázal, že se dokáže správně orientovat v dané problematice, došel k řadě důležitých poznatků a prokázal předpoklady k samostatné výzkumné činnosti. Otázky k jednotlivým částem a náměty do obecné diskuse přikládám v příloze (str. 4-5 posudku).

Předložená disertační práce splňuje všechna zákonem předepsaná kritéria. Doporučuji proto, aby byla přijata k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu byl **Ing. Michalu Junkovi** udělen akademický titul *Philosophiæ Doctor* – Ph.D.

Prof. Dr. Ing. Petr Haušild

v Praze 2.8. 2021

Příloha

Otázky a připomínky k disertační práci **Ing. Michala Junka**
Posuzování životnosti svarových spojů VT parovodů z martenzitických ocelí v podmínkách creepového poškozování

V práci je relativně malý počet překlepů (pouze např. na str. 23 „tepelné pracování“, nebo na str. 33 „Zvyšování průměrné velikosti karbidických částic v 9% Cr ocelích vlivem creepových podmínek je dobře znám …“).

V práci je opakovaně uváděn pojem šplh dislokací a to i tam, kde to není na místě – např. při Orowanově mechanismu dochází k protlačování dislokací mezi překážkami (precipitáty) skluzem, nikoli nekonzervativním šplháním. Vzorec 4 na str. 15 není pro klasický Orowanův mechanismus (ale jedná se o podobný tvar závislosti v případě creepu – viz v práci citovaný článek), tedy se nejedná ani o Orowanovo napětí.

Str. 31 „… je v inženýrských aplikacích dominujícím mechanismem dislokační creep, při kterém dochází k pohybu dislokací ve skluzových systémech (šplhání dislokací).“ – pohyb dislokací ve skluzových systémech není šplhání ale skluz!

Na str. 74-75 se uvádí, že lom ve svarovém kovu u všech vzorků degradovaných při teplotě 700 °C po dobu 10^4 h je interkrystalický křehký. Lom je prakticky bez kontrakce, ale s tažností 15%. Jde o interkrystalickou dekohezi nebo o interkrystalický tvárný lom? Z obrázku v disertační práci to nelze poznat.

Str. 83-84 „Hodnoty modulů pružnosti v tahu naměřené metodou RUS mají i přes poměrně veliký rozptyl jednoznačný trend. Data tedy byla proložena pěti různými průběhy a ty byly použity pro MKP výpočet, na kterém byl sledován vliv modulu pružnosti na rozložení napětí ve svaru.“ – Hodnoty Youngova modulu jsou v rozsahu 160-300 GPa (oproti očekávané hodnotě okolo 200 GPa). Jedná se skutečně o změnu Youngova modulu pružnosti? Dalo by se to ověřit i jinou metodou (viz bod v závěru na str. 125 „ … ověřit vliv degradačního stárnutí na změny modulu pružnosti a Poissonovy konstanty“)? Nemohlo by se jednat např. o vliv zbytkových pnutí nebo textury? Jak by se to pak projevilo ve výpočtu MKP?

Na str. 86 v kapitole Vyhodnocení teplotních cyklů pomocí MKP modelu je terminologicky nesprávně uvedeno „šíření teploty“ – teplota je vnitřní stavová veličina – nešíří se (šíří se např. teplo) – mělo jít patrně o gradient teploty nebo rychlost změny teploty, nikoli její šíření. Tato kapitola by si mimochodem zasloužila podrobnější komentář, byť se jednalo převážně o výsledky firmy VAMET.

Str. 103 – souhlasím s autorem, že na zvolenou kubickou interpolaci lze nahlížet pouze jako na orientační (srovnej koef. determinace R^2 u KCV a HV). Nebyla by vhodnější jiná závislost (byť s nižším R^2, ale s lepším fyzikálním opodstatněním)?

Námět do diskuse: Str. 105, obr. 89b – korelace mezi HV a KCV vykazuje pro P91 skokový přechod mezi cca 250 až 270 °C – nemohlo by se toho využít pro indikaci zkřehnutí?

Na str. 118 je uvedeno: „Posunutí závislosti (pozn.: *pevnosti na*) tvrdosti svarového spoje vůči ZM (Obr. 97) k vyšším hodnotám může být způsobeno několika faktory. V případě mini vzorků a GLEEBLE vzorků s menšími rozměry dříku vzorků může hrát roli velikostní faktor vzorků.“ – je-li tomu tak, pak by obdobný vliv faktoru velikosti měly vykazovat i mini vzorky ZM, což by šlo snadno ověřit…