

## OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

**Název disertační práce:** Materiálové vlastnosti heterogenních svarových spojů pro energetiku

**Disertant:** Ing. Petr Ducháček, IWE

**Vedoucí disertační práce:** doc. Ing. Jiří Janovec, CSc.

**Oponent:** prof. Ing. Jaroslav Koukal, CSc.

**Pracoviště:** ČVUT Praha, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství

Svarové spoje jsou vždy kritickým místem každé svařované konstrukce, které výrazným způsobem ovlivňují její životnost. To platí zejména pro heterogenní spoje na tlakových energetických zařízeních pracujících za zvýšených teplot jejichž životnost je ovlivňována nejen kvalitou jejich provedení a působícím napětím, ale také teplotou, konstrukcí svarových spojů, volbou přídavného materiálu, technologií svařování včetně parametrů, difuzními procesy mezi materiály s rozdílným chemickým složením, prostředím ve kterém pracují a degradačními korozními mechanismy. Problémy s životností heterogenních svarových spojů řeší v současné době jak klasické elektrárny tak i jaderné elektrárny Dukovany a Temelín.

Předložená disertační práce je proto cenným příspěvkem k řešení tohoto problému technické praxe. Cílem disertační práce je stanovení postupu zvýšení životnosti heterogenních svarových spojů ocelí v klasické i jaderné energetice za účelem zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení, včetně způsobu a postupu pro predikci životnosti těchto heterogenních svarových spojů založeného na provádění a hodnocení zkoušek mikrotvrdomosti HV01. Pro řešení problému v oblasti klasické energetiky vybral nově navržený heterogenní svarový spoj oceli 15Ch1M1F-P91. V oblasti jaderné energetiky disertant posuzoval heterogenní svarový spoj mezi ocelemi 22K a 08Ch18N10T.

### **Varianta 1 – Heterogenní svarový spoj ocelí 15Ch1M1F-P91**

Při materiálovém rozboru heterogenního svarového spoje byl:

- Posouzen návrh na provedení svarového spoje včetně návrhu přídavného materiálu a specifikace použitých základních materiálů – kap. 7.3 a 7.4
- Pro posouzení strukturní a difuzní stability bylo provedeno dlouhodobé izotermické žíhání na teplotách 600 a 650°C – kap. 7.5
- Zpracován přehled vzorků pro provedení zkoušek – kap. 7.6
- Provedeny zkoušky makro a mikrostruktury – kap. 7.7
- Analýzováno chemického složení difuzí ovlivněných oblastí – kap. 7.8
- Provedeny destruktivní zkoušky tvrdosti a mikrotvrdomosti, tahem, rázem v ohybu a tečení – kap. 7.9

Výsledky zkoušek makro a mikrostruktury, liniové EDS analýzy a liniové WDS analýzy prokázaly, že během dlouhodobé teplotní expozice probíhala difuzní redistribuce C proti koncentračnímu spádu obsahu Cr na obou stranách svarového spoje za vzniku nauhličených a

oduhličených pásem. Jejich existence byla potvrzena i měřením mikrotvrdomosti přes obě linie ztavení. U zkoušek tahem došlo k lomu v TOO oceli 15Ch1M1F. Naměřené hodnoty KV nevykazují žádné neočekávané změny. K lomu creepových zkoušek došlo v oduhličených místech v TOO oceli 15Cr1M1F.

Otázky k variantě 1:

- Jaké zpevňující mechanismy se uplatňují u nízkolegovaných bainitických Cr-Mo-V ocelí? (str. 7)
- Obsah kterého prvku je ve svarovém kovu feritických a bainitických ocelí výrazně nižší než ve svařovaném základním materiálu a proč? (str. 21)
- Způsob krystalizace svarového kovu závisí na chemickém složení a rychlosti svařování? (str. 22)
- Tabulka 7.2 – Proč byla použita tavba 508605 oceli, která nespĺňuje požadované hodnoty Rm podle TDP? Byly ověřeny hodnoty KCU?
- Doby a teploty izotermického žíhání v kap. 7.5 a tab. 7.6?
- Kde došlo k lomu zkoušených tyčí pro zkoušku tahem svarového spoje 15Ch1M1F-P91 (str. 83 a 121)?
- Byla upravena teplota zkoušky KV s ohledem na použití zkoušených tyčí o rozměru 10x5 mm (str. 83)?

### **Varianta 2 – Heterogenní svarový spoj ocelí 22K – 08Ch18N10T**

V rámci experimentálního programu zkoušek heterogenního svarového spoje 22K - 08Ch18N10T byly provedeny:

- NDT zkoušky – VT přímá a nepřímá; RT provozní, výřezu; CT tomografie výřezů – kap. 9.2
- Zkoušky makro a mikrostruktury na světelném metalografickém mikroskopu a řádkovacím elektronovém mikroskopu – kap. 9.3.2
- Analýzy chemického složení tvarovky z oceli 08Ch18N10T, nátrubku z oceli 22K, svarového kovu nataveného z materiálu Sv-10Ch16N25AM6 – kap. 9.3.2
- Lokální mikroanalýzy chemického složení na rozhraní TOO 22K – SK pomocí liniové a plošné EDS analýzy a liniové WDS analýzy – Kap. 9.3.3
- Měření tvrdosti, mikrotvrdomosti, a instrumentované nanotvrdomosti – Kap. 9.3.4
- Fraktografická analýza lomových ploch na světelném stereomikroskopu a řádkovacím elektronovém mikroskopu – Kap. 9.3.5

Provedené zkoušky prokázaly řadu výrobních vad v oblasti kořene svaru jako nepravidelný povrch, trhliny, studené spoje, vruby v kořeni, póry, nadměrné převýšení kořene a vadné napojení. Nejpresnějších výsledků bylo dosaženo použitím CT tomografie. Zkoušky prokázaly, že se trhlina iniciovaná korozi pod napětím nemusí dominantně šířit po linii ztavení oceli 22K a svarového kovu Sv-10Ch16N25AM6, ale může se šířit v blízkosti linie ztavení ve SK Sv-10Ch16N25AM6 v oblasti kde je díky promísení ZM a SK, rychlosti tuhnutí a odmísení během tuhnutí snížen obsah Cr, Mo a Ni doprovázený segregací P a S. Změny chemického složení oblasti TOO oceli 22K, LZ, SK Sv-10Ch16N25AM6 prokázaly provedené liniové a plošné EDS analýzy, liniové WDS analýzy a měření mikrotvrdomosti a instrumentované nanotvrdomosti.

Dominantním mechanismem poškozování heterogenních svarových spojů ocelí 22K – 08Ch18N210T je koroze pod napětím. Rychlost tohoto poškozování je ovlivňována prostředím, materiálem a teplotou. Prostředí a provozní teplota spoje je obvykle dána. Proto se disertant při návrhu optimálního řešení tohoto spoje prezentovaného na obr. 12.9 zaměřil na volbu přídavných materiálů a konstrukčně technologické řešení spoje. Mezikus heterogenního svarového spoje se svařuje v dílenských podmínkách s přídavkem na opracování. To eliminuje možnost vzniku koncentrátorů napětí v kořeni svaru, který je ve styku s korozním médiem. Pro navaření jednotlivých návarů doporučuji pro zmenšení promísení svařovaných materiálů použít metody svařování s malým tepelným příkonem  $Q$  do svarového spoje. Další zlepšení by se mohlo dosáhnout galvanickým nanesením antikorozičního povlaku na vnitřní stranu opracovaného dílensky vyráběného mezikusu. Toto řešení se již dnes v některých případech používá.

Měření mikrotvrdosti je jak prokázal disertant možné použít pro lokalizaci nauhličených a oduhličených zón a jejich šířky, obecně lokálních heterogenit materiálových vlastností, které signalizují zvýšenou náchylnost k působení degradačních mechanismů. Oceňuji proto návrh disertanta uvedený v příloze B práce. Navrhované kritérium  $HV01 \leq 100$  však bylo stanoveno na základě malého souboru výsledků. Doporučuji proto tuto hodnotu ověřit na širším souboru výsledků jak z hlediska spojovaných materiálů, tak i z hlediska různých korozních medií a pracovních teplot.

Otázky k variantě 2:

- Proč nebyly ověřeny hodnoty KV v materiálu P91 – tab. 7.4
- Je možné v první oblasti ve svarovém kovu Sv-10Ch16N25AM6 o šířce  $\sim 50\mu\text{m}$  dosáhnout obsahu uhlíku  $\sim 5\%$  (str. 106) ?
- Vysvětlíte, proč je z charakteru poškození zřejmé, že k významné propagaci trhliny nedochází v průběhu provozu na nominálním výkonu, ale při změnách provozních režimů (str. 130)
- Vysvětlíte účel jednotlivých návarů na obr. 12.9

### **Celkové hodnocení disertační práce:**

Disertační práce obsahuje nadstandardně velký soubor výsledků hodnocení materiálových vlastností dvou vybraných typů heterogenních svarových spojů. Pro jejich získání disertant použil nejnovější metody hodnocení celistvosti svarových spojů a hodnocení jejich materiálových vlastností. Jednoznačně prokázal, že je schopen vědecky pracovat.

Formální úprava a jazyková úroveň práce je velmi dobrá. Vytknout lze pouze neopravené překlepy a v některých případech používání nestandardní terminologie jako např. „podtavení“ nebo „koruna svaru“. Některé obrázky např. 10.10 se zmenšením dostaly na hranici sledovatelnosti.

Na základě výše uvedeného hodnocení předložené disertační práce doporučuji po úspěšné obhajobě udělit disertantovi akademický titul Ph.D.

V Ostravě 18.01.2022

prof. Ing. Jaroslav Koukal, CSc.