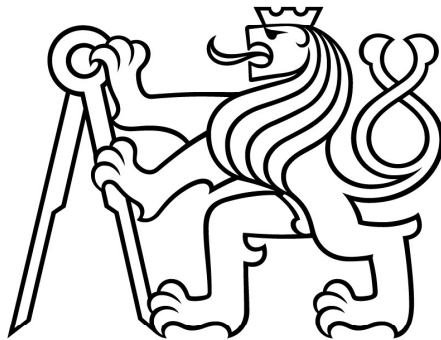


**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV materiálového inženýrství

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Materiálové vlastnosti heterogenních svarových spojů  
pro energetiku

*Ing. Petr Ducháček, IWE*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

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

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Název anglicky: Material Properties of Dissimilar Metal Welds for  
Power Engineering

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na  
Ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Petr Ducháček, IWE  
Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Karlovo náměstí 13, Praha 2, 121 35

Školitel: Doc. Ing. Jiří Janovec, CSc.  
Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Karlovo náměstí 13, Praha 2, 121 35

Školitel-specialista: Ing. Marie Svobodová, Ph.D.  
ÚJP PRAHA a.s.  
Nad Kamínkou 1345, Praha Zbraslav, 156 10

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.  
v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Karlovo  
náměstí 13, Praha 2  
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Materiálové  
inženýrství.  
S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní  
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
předseda oborové rady oboru Materiálového inženýrství  
Fakulta strojní ČVUT v Praze

## OBSAH

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	4
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	5
3. METODY ZPRACOVÁNÍ.....	6
3.1 Varianta 1 – experimentální materiál .....	6
3.2 Varianta 1 – experimentální metody .....	7
3.3 Varianta 2 – experimentální materiál .....	8
3.4 Varianta 2 – experimentální metody .....	8
4. VÝSLEDKY .....	9
4. 1 Varianta 1 – výsledky měření .....	9
4. 2 Varianta 2 – výsledky měření .....	14
5. ZÁVĚR .....	20
6. PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTACE.....	22

## 1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Cílem energetiky je zajištění spolehlivé a bezpečné dodávky energie pro potřeby obyvatelstva i ekonomiky s ohledem na dlouhodobou udržitelnost z pohledu finančně-ekonomického i životního prostředí. Současně je nutné zabezpečit nepřerušené dodávky energie v krizových situacích, a to v potřebném rozsahu pro fungování kritické infrastruktury státu a nutných potřeb obyvatel. V České republice je spotřeba primárních energetických zdrojů pokryta téměř z 50 % domácími zdroji. Ukazatel dovozní energetické závislosti ČR patří k nejnižším včetně zahrnutí jaderného paliva [1]. ČR je soběstačná ve výrobě elektřiny a tepla, elektrickou energii dlouhodobě exportuje. Predikce však v tomto směru optimistické nejsou. Hlavními zdroji elektrické energie v ČR jsou uhelné a jaderné elektrárny. Ostatní zdroje mají minoritní zastoupení. Výraznější výkyvy ve výrobě se očekávají od roku 2025, kdy by mělo dojít k odstavení zastaralých uhelných elektráren. Naopak s pozitivním výkyvem počítá koncepce v letech 2033 až 2037, kdy se předpokládá zapojení nových jaderných zdrojů [2].

Energetika zahrnuje i výstavbu a výrobu energetických zařízení. Jedná se o složité konstrukce zhotovené z řady různých materiálů, kde rozdílné provozní podmínky (změny teploty, tlaku, koroze atd.) nutí realizační tým vyřešit jejich napojení. Existuje mnoho konstrukčních a technologických způsobů, jak tento problém řešit, ale zatím nejběžnější je technologie svařování. V energetických provozech patří mezi problémové svarové spoje přechody mezi komponenty, které jsou vyrobeny z řady různých materiálů. Nejběžnější je kombinace nízkolegovaných ocelí s vysokolegovanými, jedná se o jednoho ze zástupců skupiny heterogenních svarových spojů.

Disertační práce se zaměřuje na životnost heterogenních svarových spojů v oblasti klasické a jaderné energetiky, která je stěžejním parametrem pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení elektráren. Práce se zabývá hodnocením dvou konstrukčně-technologických typů heterogenních svarových spojů:

*varianta 1* – spoj bainitické oceli 15Ch1M1F a martenzitické oceli P91, přídavný materiál z bainitické oceli P23, heterogenní svarový spoj provozovaný v uhelné elektrárně,

*varianta 2* – spoj feriticko-perlitické oceli 22K a austenitické oceli 08Ch18N10T, přídavný materiál z austenitické oceli Sv-10Ch16N25AM6, heterogenní svarový spoj provozovaný v jaderné elektrárně,

a to především z pohledu jejich materiálových vlastností a odolnosti proti degradačním procesům, které na ně během provozu působí.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Rešerše byla věnována degračním mechanismům působících na vybrané heterogenní svarové spoje ocelí klasických a jaderných elektráren. Na základě takto získaných poznatků je navržen experimentální program, jehož cílem je formou výzkumně-vývojových činností získat podklady pro definování možných způsobů konstrukčně-technologických provedení, kterými lze dosáhnout zvýšení životnosti heterogenních svarových spojů ocelí v provozním prostředí, pro které jsou tyto spoje určeny a v nichž na ně působí identifikované degrační mechanismy.

Heterogenní svarové spoje jsou rizikovým faktorem z pohledu konstrukčního, materiálového, technologického a i z důvodu absence relevantního hodnocení kvality. Ze standardně používaných technologických zkoušek pro hodnocení kvality homogenních svarových spojů v rámci kvalifikace postupů svařování je normou ČSN EN ISO 15614-1 předepsána zkouška tvrdosti podle Vickerse HV10 dle ČSN EN ISO 9015-1. Zároveň jsou normou ČSN EN ISO 15614-1 definována kritéria přípustnosti pro některé skupiny ocelí v tepelně zpracovaném i nezpracovaném stavu. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně jednoduchou, časově nenáročnou a relativně ekonomicky dostupnou zkoušku, která poskytuje jasné a kvantifikovatelné výsledky, lze uvažovat o analogickém přístupu pro hodnocení kvality heterogenních svarových spojů využitím modifikované zkoušky tvrdosti ve formě zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse HV0,1. Jedním z cílů disertační práce je proto vypracování metodického přístupu pro provádění a hodnocení heterogenní svarových spojů ocelí prostřednictvím zkoušky mikrotvrdosti. Výsledkem výše popsaných činností a výstupů bude vytvoření podkladu pro normativní předpis pro hodnocení kvality heterogenních svarových spojů. Pro dosažení uvedených cílů disertační práce byl stanoven následující postup činností:

- Materiálový rozbor uměle degradovaného nově navrženého heterogenního svarového spoje 15CH1M1F-P91.
- Materiálový rozbor provozovaného heterogenního svarového spoje 22K-08Ch18N10T.
- Popis degradace heterogenního svarového spoje 15CH1M1F-P91.
- Rozbor příčin porušení degradovaného heterogenního svarového spoje 22K-08Ch18N10T.
- Na základě experimentálních výsledků stanovit návrh úpravy provozních podmínek pro zlepšení životnosti a spolehlivosti heterogenních svarových spojů.

- Zvýšení životnosti heterogenního svarového spoje stanovením návrhu jeho konstrukčně-technologického provedení.
- Stanovení vhodnosti přídatných materiálů a konstrukčních řešení s ohledem na degrační procesy: creep, SCC aj.
- Navržení podkladu pro normativní přístup k provádění a hodnocení heterogenních svarových spojů pomocí mikrotvrdosti.

### 3. METODY ZPRACOVÁNÍ

#### 3.1 Varianta 1 – experimentální materiál

Na základě požadavku na údržbu uhelné elektrárny v Srbsku, kde bylo potřeba vyřešit spojení stávajících trubek z oceli 15Ch1M1F (dále bude používáno zkrácené označení 15Ch) s nově instalovanými ohyby z oceli P91, vzniklo několik návrhů provedení svarového spoje těchto ocelí. Tento spoj je svou kombinací materiálů atypický a nebyl projektově řešen. Nebyly dohledány ani zkušenosti s ekvivalentními oceli. Na základě tohoto požadavku, byla vypracována studie Termodynamická a difúzní stabilita heterogenního svarového spoje 15CrMoV5-10 (15Ch1M1F)–X10CrMoVNB9-1 (P91) [3], která měla za cíl výpočtovou metodou CALPHAD posoudit dlouhodobou termodynamickou a difúzní stabilitu heterogenního svaru s navrhovanými přídatnými materiály typu *Thermanit P23 a Al Cromo E 300V*. Výsledné doporučení této zprávy je použití přídatného materiálu typu P23, který je fázově a strukturně stabilnější při uvažované provozní teplotě 540 °C než přídatný materiál E300V.

- Heterogenní svarový spoj Varianty 1 – 15Ch-P91

Na obrázku 1 je návrh heterogenního svarového spoje 15Ch–P91 s geometrií přípravy svarových ploch (úkosů) na trubkách a následné kladení jednotlivých výplňových vrstev (housesek) v poloze svařování PH dle ISO 6947. Tvar úkosů respektuje technické zvyklosti svařování pro jednotlivé části spoje a použité technologie svařování:

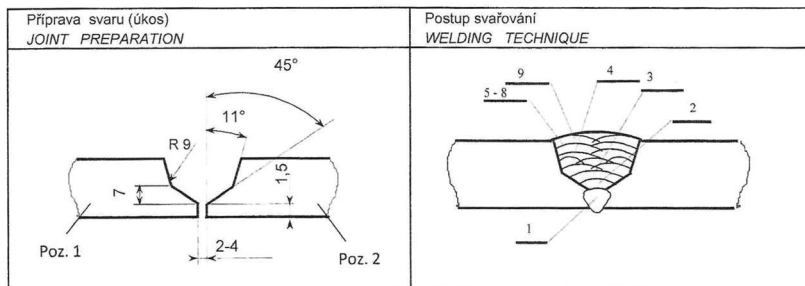
*kořenová část* – metodou 141 dle ISO 4063 (GTAW, obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu);

*výplňová část včetně krycí vrstvy* – metodou 111 dle ISO 4063 (MMAW, ruční obloukové svařování obalenou elektrodou).

Požadavky vstupují z materiálového hlediska výšelegované martenzitické oceli P91 (skupina 6.4), která je svařitelná při dodržení předeřevu (stanoven na min. 251 °C) a mezihousenkové teploty (interpass) stanovené



na max. 300 °C ( $M_f$  a  $M_s$  se pohybují v rozmezí 105 °C až 390 °C pro ocel P91) za účelem zajištění transformace martenzitu TOO P91 v celém objemu. PWHT (stanoven na 735 °C /150 min.).



Obr. 1 Náčrt přípravy svarových ploch (úkosů) s postupem svařování pro heterogenní svarový spoj 15Ch–P91

Pro posouzení strukturní a difúzní stability heterogenního svarového spoje 15Ch–P91 byly vybrané segmenty (výřezy) tohoto spoje vystaveny dlouhodobému izotermickému žihání na vzduchu bez použití inertních či jiných atmosfér. Svarové spoje byly degradovány v elektrických odporových pecích při teplotách a časech:

*VS* – výchozí stav po PWHT, (bez izotermického žihání);

600 °C – 100, 500, 1 000, 2 088, 5 000 a 10 000 hodin;

650 °C – 100, 500, 1 000, 2 000 a 5 000 hodin.

Volba teplot byla volena o něco vyšší, než je provozní teplota 540 °C s plánovanou dobou životnosti  $10^5$  h, přičemž důvodem bylo urychlení degračních procesů.

### 3.2 Varianta 1 – experimentální metody

- Hodnocení makrostrukturních a mikrostrukturních změn

Svarové spoje byly podrobeny hodnocení dle prováděcí normy ČSN EN ISO 17639 s kritérii přípustnosti dle ČSN EN ISO 5817-B.

Jednotlivá obrazová dokumentace heterogenních svarových spojů byla realizována:

*Makrostruktury svarů* – se zvětšením 50x;

*Mikrostruktury svarů* – se zvětšením 100x, 500x a 1 000x;

*Makrostruktury lomových ploch svarů;*

*Mikrostruktury lomových ploch svarů.*

- Analýza chemického složení difúzí ovlivněných oblastí

Analýzy chemického složení byly realizovány pomocí liniové *EDS* a *WDS* analýzy na vzorcích VS, 600 °C /10 000 h a 650 °C /5 000 h. U vzorků byla proměřena liniová chemická analýza v místě chemického gradientu legujících prvků (převážně Cr), tedy v místě redistribuce intersticiálního prvku C.

- Hodnocení mechanických vlastností pomocí destruktivních zkoušek

*Tvrdość HV10 a mikrotvrdość HV0,1* – pro všechny stavy;

*Zkouška tahem* – VS, 600 °C /5 000 h a 600 °C /10 000 h;

*Zkouška rázem v ohybu* – VS, 600 °C /5 000 h a 600 °C /10 000 h;

*Zkouška tečení - creep* – VS, 600 °C /5 000 h a 600 °C /10 000 h.

### 3.3 Varianta 2 – experimentální materiál

Po zhruba 15letém provozu JE Temelín došlo ke vzniku netěsnosti na II. O. s únikem média v heterogenním svarovém spoji mezi parogenerátorovým nátrubkem N5 z oceli 22K a korozivzdornou tvarovkou z oceli 08Ch18N10T. Za účelem zjištění kořenové příčiny poškození byl sestaven experimentální program, který se skládal z nedestruktivních a destruktivních analýz. Na základě vzniku této netěsnosti byly provedeny NDT (VT, PT a RT) kontroly všech heterogenních svarových spojů nátrubků N5 (drenážní nátrubek) a N6 (nátrubky periodického odkalu) na všech PG ETE (na 1. a 2. HVB). Vzhledem k četnosti nalezených vad bylo rozhodnuto poškozené heterogenní svarové spoje nátrubků PG vyříznout a nahradit je novými. Vyjmuté heterogenní svarové spoje byly podrobeny experimentálnímu zkoušení pro stanovení příčin poškození.

### 3.4 Varianta 2 – experimentální metody

- NDT kontroly

*VT kontrola;*

*RT kontrola;*

*CT tomografie.*

- DT zkoušky

*nepřímá VT kontrola;*

*metalografický rozbor;*

*analýzy chemického složení*

*měření tvrdosti, mikrotvrdosti a instrumentované nanotvrdosti*

*fraktografická analýza.*

## 4. VÝSLEDKY

### 4. 1 Varianta 1 – výsledky měření

- Mikrostrukturní degradace

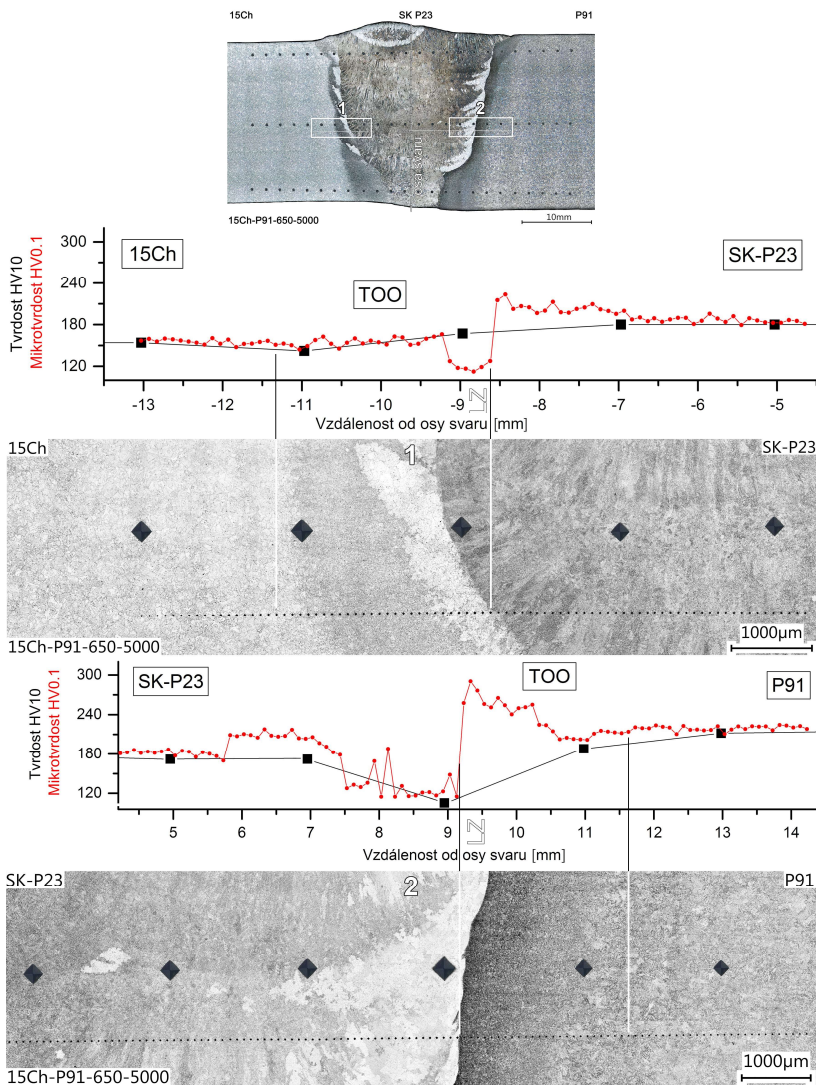
Mikrostrukturní změny a stabilita mikrostruktury jsou kritickými faktory, ovlivňujícími životnost heterogenního svarového spoje 15Ch-P91. Výsledky metalografického a chemického rozboru a mechanických zkoušek včetně creepových prokázaly, že během dlouhodobější teplotní expozice se v materiálu heterogenního svarového spoje výrazně projeví vysokoteplotní difúzí vzniklé oduhličené oblasti díky redistribuci intersticiálního uhlíku přes obě linie ztavení a tvorba creepových kavit při spolupůsobení vysokého tahového namáhání.

- Difúzí ovlivněné oblasti

Zcela v souladu s výsledky simulace pomocí metody CALPHAD byly v průběhu teplotní expozice při teplotách 600 °C a 650 °C pozorovány rozšiřující se oblasti oduhličení (CDZ) a nauhličení (CEZ) na obou stranách linie ztavení heterogenního svarového spoje. CDZ a CEZ dosahují své maximální šířky (2,2 mm pro CDZ a 100 µm pro CEZ) po expozici 650 °C /5 000 h, a to na rozhraní SK P23–P91. Chemický rozbor s využitím EDS a WDS pak ukázal na rozdíl až 0,12 hm. % v obsahu uhlíku mezi CDZ a CEZ.

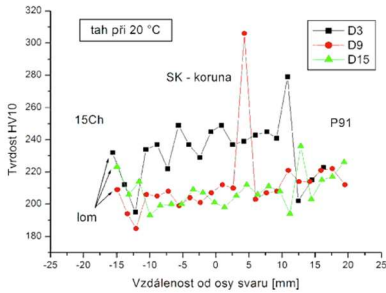
Vliv redistribuce uhlíku a s ním spojené rozšiřování CDZ a CEZ byly také zachyceny při měření tvrdosti a mikrotvrdosti přes obě LZ, jak dokumentuje obrázek 2. Je patrné, že mikrotvrdost HV0,1, která byla zvolena s ohledem na dovolenou vzdálenost vtisků zamezující jejich vzájemnému ovlivnění, je dostatečně jemná, aby bezpečně zaznamenala CDZ a CEZ.

Korelace tvrdosti, resp. mikrotvrdosti s mikrostrukturou jednotlivých degradovaných stavů heterogenního svarového spoje byla doplněna o pevnostní charakteristiky při zkoušce tahem, kdy z tahových tyčí byly navíc připraveny podélné metalografické výbrusy. Na nich pak byla stanovována přesná oblast výskytu lomu a měřen profil tvrdosti přes svarový spoj. Porovnání získaných profilů pro výchozí stavy (vzorky D1, D2, D3), po expozici 600 °C /5 000 h (vzorky D9, D10, D12) a po expozici 600 °C /10 000 h (vzorky D13, D14, D15) ukazují grafy na obrázku 3. Až na vzorek D2 došlo k lomu vždy na straně oceli 15Ch na rozhraní mezi základním materiálem a pásmem částečné překrytalizace.

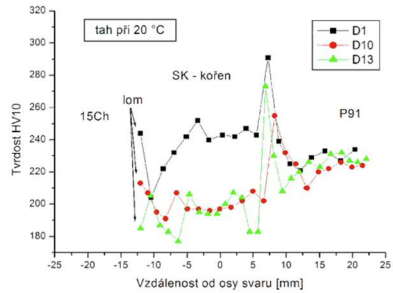


Obr. 2 Porovnání mikrostrukturních změn s průběhem tvrdosti HV10 a mikrotvrdosti HV0,1 heterogenního svarového spoje oceli 15Ch-P91 – 650 °C / 5 000 h

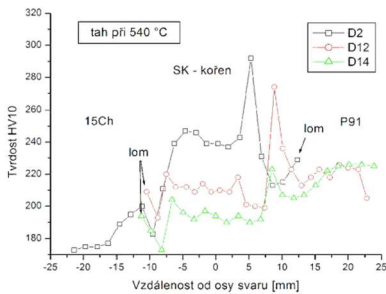
V grafech lze jasně pozorovat pokles tvrdosti ve svarovém kovu a základním materiálu 15Ch s rostoucí dobou teplotní expozice, zatímco tvrdost oceli P91 se mění jen nepatrně. Naopak v blízkosti LZ u oceli P91 výrazně roste tvrdost CEZ, doprovázena silným poklesem tvrdosti CDZ na straně SK P23 a na opačné LZ na straně oceli 15Ch. Viditelný nárůst tvrdosti v těsné blízkosti místa lomu je jen důsledkem lokální plastické deformace.



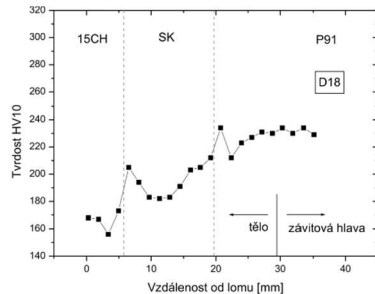
(a) : Zkušební tyč – D3, D9 a D15



(b) : Zkušební tyč – D1, D10 a D13



(c) : Zkušební tyč – D2, D12 a D14



(d) : Zkušební tyč – D18

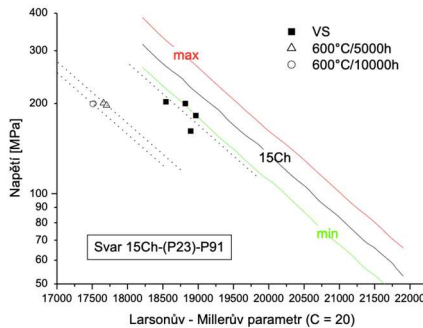
Obr. 3 Profil tvrdosti přes svarový spoj na tyčích po zkoušce tahem (a-c) a creepem (d)

- Creepové chování heterogenního spoje

Ze záznamu vývoje creepové deformace během creepové zkoušky vzorků D8 (výchozí stav + 199,8 MPa/1390 h) a D17 (600 °C/10 000 h + 199,1 MPa/35 h) lze pozorovat zhruba uprostřed u vzorku D8 sekundární stadium se stabilní creepovou rychlostí, která je zakončena lokálním nárůstem deformace. Creepové expozice vzorku D17 se jevila příliš krátká, aby se tento jev na creepové křivce projevil.

- Promítnutí výsledků do provozních podmínek

Urychlené stárnutí při teplotách 600 °C a 650 °C bylo zvoleno z důvodu dosažení mikrostrukturních stavů heterogenního svarového spoje na konci životnosti. Za určitých podmínek lze [4] využít Larsonovy-Millerovy konstrukce k extrapolaci creepových výsledků a usuzovat na chování svarového spoje při provozních podmínkách při teplotě 540 °C. Protože všechny creepové zkoušky (tělesa odebraná jak z výchozího stavu po PWHT= VS, tak ze stavu po laboratorním umělém stárnutí 600 °C /5 000 h a 600 °C /10 000 h) skončily lomem na straně oceli 15Ch, lze k hodnocení creepového chování heterogenního svarového spoje 15Ch–P91 využít porovnání se základním materiálem 15Ch, převzaté z [5] jak je znázorněno v grafu na obrázku 4, kde jsou uvedeny 20% toleranční pásy (jedná se o běžnou konstruktérskou praxi, kde se předpokládá, že svarový spoj snižuje creepovou pevnost základního materiálu nejvýše o 20 %). Výsledky creepových zkoušek heterogenního svarového spoje ve VS leží právě na dolním tolerančním pásu, z čehož lze konstatovat, že svaření oceli 15Ch s ocelí P91 (s přídavným materiálem P23) již samo o sobě snižuje creepovou odolnost oceli 15Ch na její minimální toleranci (přesněji o zhruba 28,0 % od master-křivky pro základní materiál).

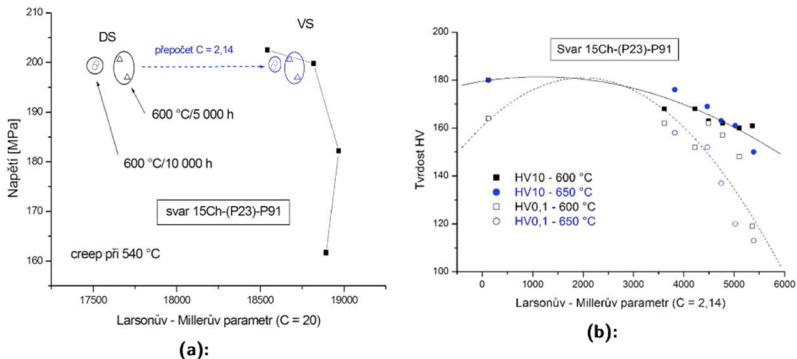


Obr. 4 Parametrické zpracování výsledků creepových zkoušek heterogenního svarového spoje 15Ch-P91

Přidáním výsledků creepových zkoušek těles po předchozím umělém stárnutí, kdy jedno těleso bylo odebráno z koruny a jedno z kořene svaru, lze demonstrovat, že creepové chování těles odebraných z koruny svaru je stejné jako creepové chování těles odebraných z kořene svaru a že umělé stárnutí při teplotě 600 °C má po prvních 5 000 hodinách větší vliv na zhoršení creepové odolnosti (snížení o 60,4 % oproti VS svaru) než druhých 5 000 hodin (snížení o 73,2 % oproti VS svaru). Za tímto konstatováním je nicméně

schován předpoklad, že umělé stárnutí pouze popustí bainitickou strukturu heterogenního svarového spoje a následující creepová expozice proběhne se stejným mechanismem jako u výchozího stavu. Aby bylo možno tento předpoklad ověřit, je zapotřebí stanovit vliv umělého stárnutí, při němž dochází pouze k působení teploty (bez napětí), vůči creepové expozici, při níž se uplatňují oba faktory – jak teplota, tak napětí.

Kdyby byl vliv napětí oproti teplotě zanedbatelný a konstanta Larsonova–Millerova parametru byla platná pro celý teplotní interval 540 °C až 600 °C, degradovaný stav 600 °C / 5 000 h by po creepu (vzorek D19) odpovídal době do lomu 280 317 (stárnutí) + 52 (creep) h = 280 369 h, což je víc jak 200x více než skutečná doba do lomu výchozího stavu svaru. Je tedy zřejmé, že během creepové zkoušky dochází k jinému mechanismu degradace než jen degradaci teplotní a vliv napětí tedy nelze zanedbat. Mechanismy degradace jsou u creepu a umělého stárnutí různé, mají tedy jiné konstanty  $C$  v Larsonově–Millerově konstrukci. Vliv předchozího umělého stárnutí lze vyjádřit obráceně z grafického posunu hodnot na obrázku 4 pro degradovaný stav k hodnotám pro stav výchozí. Tento posun je vyjádřen rozdílem absolutních hodnot extrapoláčních přímk pro VS a degradované stavy, z něhož získáme novou konstantou  $C = 2,14$  pro předchozí umělé stárnutí, (viz obrázek 5a). S novou konstantou pro umělé stárnutí samozřejmě dostáváme i nové parametrické zpracování závislosti naměřené tvrdosti na teplotě a době expozice, které ukazuje graf na obrázku 5b. Z něj je patrná výrazná klesající závislost mikrotvrdosti na době a teplotě expozice, na rozdíl od tvrdosti, která dostatečně nepostihne tvorbu CEZ a CDZ.



Obr. 5 Stanovení konstanty  $C$  pro umělé stárnutí z výsledků creepových zkoušek (a) a vyjádření průběhu tvrdosti svaru 15Ch–P91 s novou konstantou  $C = 2,14$  (b)

## 4. 2 Varianta 2 – výsledky měření

- NDT kontroly

Výsledky provedených provozních objemových kontrol (RT) na vybraných heterogenních svarových spojích nátrubků parních generátorů JE Temelín odhalily řadu vad, které vznikly jak montážním způsobem výroby mezi nátrubky z oceli 22K a austenitickými tvarovkami z oceli 08Ch18N10T, tak provozními degračnými mechanismy. Na výřezy těchto heterogenních svarových spojů byly aplikovány moderní (CT tomografie) a standardní postupy (nepřímá VT, RT-SWSI a DT zkoušky), které přesněji identifikovaly a popsaly rozsah poškození. Nejpresnějších výsledků bylo dosaženo využitím CT tomografie, která díky vysoké citlivosti s možností trojrozměrného pozorování umožnila detailně zmapovat trhliny (komunikující s vnitřním a vnějším povrchem a vnitřní nespojitosti). Výsledky CT tomografie byly následně potvrzeny na základě provedených fraktografických analýz.

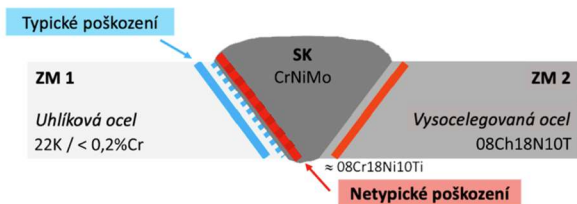
- DT zkoušky

DT zkoušky ukazují, že heterogenní svarové spoje byly zhotoveny montážním způsobem, nikoliv jako dílenské svarové spoje. Tento způsob výroby svarových spojů je v tomto případě doprovázen řadou výrobních vad v oblasti kořene. Jedná se zejména o vady geometrického a tvarového charakteru. Tyto vady významným způsobem zvyšují koncentraci napětí v kritickém místě heterogenního svarového spoje, tedy v přechodu TOO a SK.

Při bližším zkoumání prostřednictvím příčných metalografických řezů bylo zjištěno, že trhlina se dominantně nešíří po linii ztavení v méně ušlechtilé oceli 22K, ale naopak se šíří v blízkosti linie ztavení ve svarovém kovu Sv-10Ch16N25AM6. Doc. Bystrianský ve svých pracech [6, 7] tento jev rozděluje na tzv. typické poškození a netypické poškození (viz obrázek 6). Za typické poškození je považováno anodické rozpouštění méně ušlechtilé oceli (materiálu) v heterogenním svarovém spoji vlivem působení elektrolytu. K netypickému poškození dochází vlivem korozního praskání pod napětím v oblasti svarového kovu v blízkosti linie ztavení. Tato oblast je charakterizována planární strukturou, ve které je snížený obsah všech hlavních legujících prvků svarového kovu. Výsledná kompozice této oblasti je způsobena: promísením ZM 22K a SK Sv-10Ch16N25AM6, rychlostí tuhnutí, heterogenitou rozhraní, odmísení během tuhnutí, které je doprovázeno segregacemi prvků P a S. Z fraktografických analýz byla zjištěna časová závislost s etapovitým průběhem, v němž byly některé části trhliny realizovány lokálně nestabilním lomem. Materiálová predispozice,



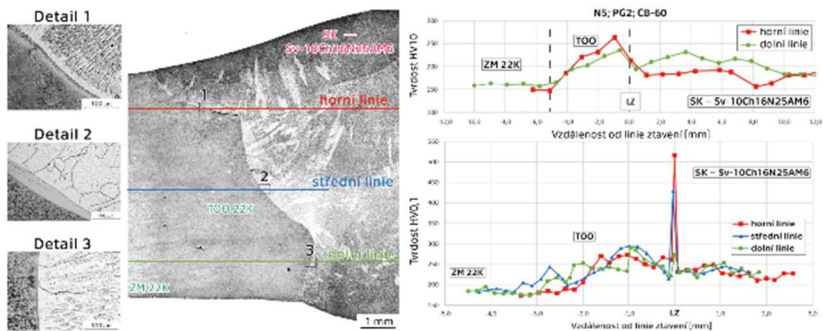
geometrie kořenové oblasti heterogenního svaru spolu s provozními podmínkami (působení vodného prostředí) způsobily poškození kombinací korozního a napětově-deformačního mechanismu.



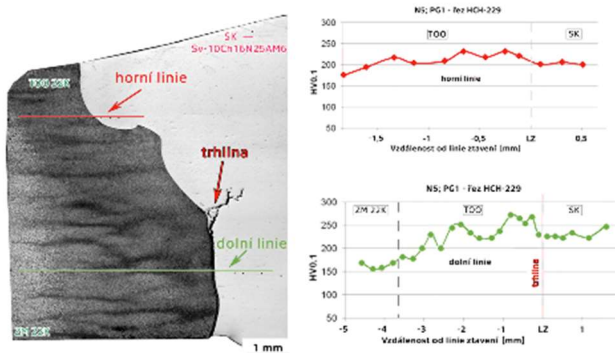
Obr. 6 Schematické znázornění typického a netypického poškození heterogenního svarového spoje 22K–08Ch18N10T, převzato z [6]

Korozní praskání pod napětím je založeno na spolupůsobení třech hlavních faktorů, a to prostředí, materiál a napětí. Z pohledu provádění svarových spojů lze relativně jednoduše ovlivňovat pouze jeden z těchto faktorů, kterým je materiál – svarový kov. Při hodnocení vlastností svarových spojů v rámci výroby heterogenních svarových spojů a optimalizace procesu svařování se jeví jako vhodné vodítko pro určení základních vlastností svarového spoje provedení zkoušek tvrdosti, resp. mikrotvrdosti. Tyto zkoušky poskytují informaci o mikrostrukturních změnách, které probíhají v oblasti linie ztavení a svarového kovu a které jsou reprezentovány změnami tvrdosti, resp. mikrotvrdosti. Zejména mikrotvrdost slouží k poměrně přesnému popisu gradientu mikrotvrdosti v malých objemech materiálu (viz obrázek 7b).

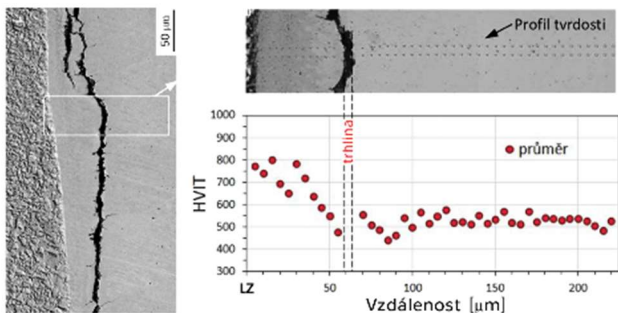
Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti mají své normy pro provádění těchto zkoušek u svarových spojů. Pro zkoušky tvrdosti platí norma ČSN EN ISO 9015, část 1 (zkouška tvrdosti) a část 2 (zkouška mikrotvrdosti), které popisují metodiku provádění. Z pohledu vyhodnocení zkoušek tvrdosti lze využít normu pro kvalifikaci postupu svařování ČSN EN ISO 15614-1, která v Tabulce 3 uvádí kritéria přípustnosti pro zkoušky tvrdosti (HV10), které jsou vztaženy ke skupinám materiálu podle CEN TR ISO 15608. Bohužel tato norma nezohledňuje vyhodnocení zkoušek tvrdosti ve vztahu k heterogenním svarovým spojům, proto je předložen návrh přílohy B k normě ČSN EN ISO 9015-2 pro provádění a hodnocení zkoušek mikrotvrdosti (HV0,1) viz obrázek 8.



(a) : Průběh tvrdosti HV10 a mikrotvrdosti HV0.1 – N5; PG2 pozice CB 60



(b) : Průběh mikrotvrdosti HV0.1 – N5; PG1 pozice HCH-229



(c) : Průběh instrumentované tvrdosti HVIT – N5; PG1 pozice ED-127

Obr. 7 Průběhy tvrdosti, mikrotvrdosti a instrumentované nanotvrdosti přes rozhraní TOO 22K – SK (Sv-10Ch16N25AM6) na heterogenním svarovém spoji 22K–08Ch18N10T

## B.1. Postup zkoušky pro heterogenní svarové spoje ocelí

### B.1.1. Řada vtisků (R)

Obrázky B1 a B2 ukazují typické příklady pro umístění vtisků tvrdosti provedených v řadách, včetně jejich vzdálenosti od povrchu, tak aby řady nebo jejich části umožnily vyhodnocení heterogenního svarového spoje. Pokud je předepsáno, např. technikou specifikací na požadavek konstruktéra, technologa, nebo jinou osobou zodpovědnou za návrh heterogenního svarového spoje, mohou být doplněny dodatečné řady vtisků a/nebo různé oblasti. Pro celkový přehled o gradientech tvrdosti v jednotlivých oblastech heterogenního svarového spoje se doporučuje využití mapy tvrdosti, tzn. provedení měření tvrdosti v rastru o přesně definované vzdálenosti mezi vtisky. Skutečné provedení se vzdálenostmi jednotlivých vtisků musí být uvedeno ve zkušební zprávě.

Počet a rozmístění vtisků musí být dostatečné k určení oblastí se zvýšenou a/nebo sníženou tvrdostí v důsledku svařování, popř. následného tepelného zpracování heterogenního svarového spoje. Doporučená vzdálenost  $L$ , mezi středy vtisků je uvedena v tabulce B1 v návaznosti na dělení skupin ocelí dle TNI CEN ISO/TR 15608.

**Tabulka B1 – Stanovená vzdálenost,  $L$ , mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti a oblasti podtavení svarového kovu pro řady vtisků (R)**

Fázové rozdělení ZM1 / ZM2	Skupiny ocelí dle TNI CEN ISO/TR 15608		Stanovená vzdálenost mezi vtisky, $L^a$ [mm]
	ZM1	ZM2	
ferit / ferit	1	6, 7	0,15
	6	7	0,10
ferit / austenit	1	8	0,15
	6, 7	8	0,10

<sup>a</sup> Vzdálenost mezi středním bodem nesmí být menší než minimální hodnota povolená v ISO 6507-1

## B.2. Výsledky zkoušky

Hodnoty tvrdosti se musí zaznamenat s ohledem na polohu vtisku.

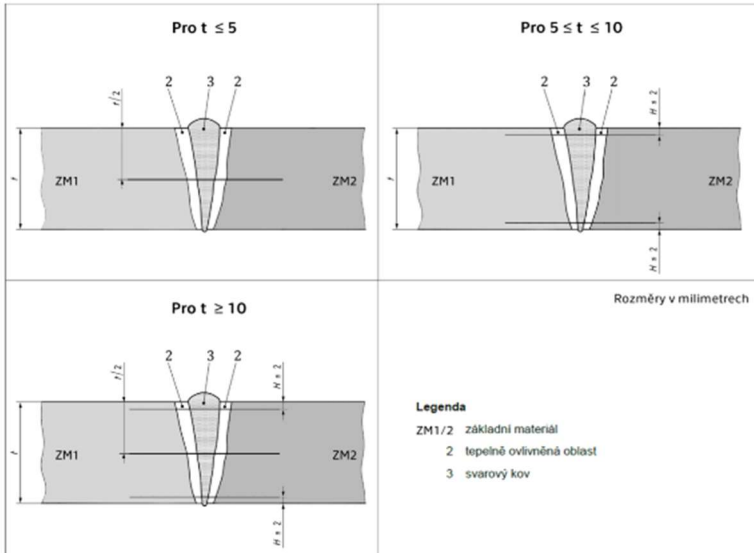
## B.3. Hodnocení zkoušky

Pokud je rozdíl sousedních hodnot mikrotvrdosti  $\leq 100\text{HV}_{0,1}$  je mikrotvrdost hodnocena jako přípustná.

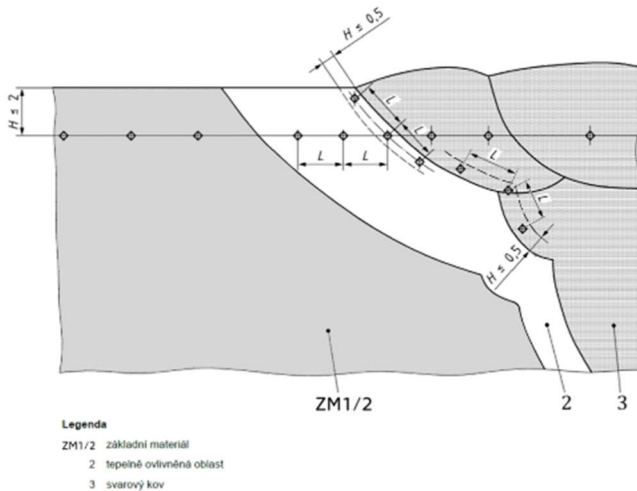
V případě, že je mikrotvrdost  $> 100\text{HV}_{0,1}$ , musí být provedeno posouzení konstruktérem, technologem nebo jinou osobou zodpovědnou za návrh heterogenního svarového spoje, na základě, kterého je stanoveno, zda je mikrotvrdost přípustná nebo nepřípustná.

Pozn. Pro účely map mikrotvrdosti je za sousední hodnotu považován i vtisk umístěný úhlopříčně.

*Obr. 8 Návrh přílohy B k normě ČSN EN ISO 9015-2*



**Obrázek B1 – Příklad řad vtisků (R) - dělení dle tloušťky materiálu pro tupé heterogenní svarové spoje ocelí**



**Obrázek B2 – Umístění vtisků v tupém heterogenním svarovém spoji ocelí – doplňkové vtisky v tepelně ovlivněné oblasti a v oblasti podtavení svarového kovu**

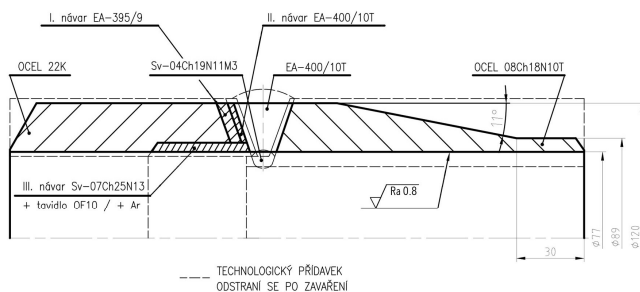
*Obr.8 (pokračování) Návrh přílohy B k normě ČSN EN ISO 9015-2*

- Nápravná opatření k řešení problematiky heterogenních svarových spojů Varianty 2

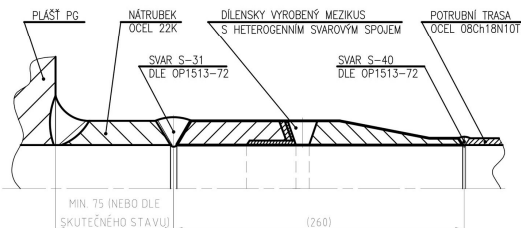
Za účelem zvýšení provozní spolehlivosti heterogenních svarových spojů 22K–08Ch18N10T je možno přistupovat k heterogenním svarovým spojům několika konstrukčně-technologickými způsoby. Obecně lze říci, že odolnost proti SCC ovlivňují zejména tři faktory – materiál, prostředí a napětí.

S ohledem na výše uvedené a na výsledky rozsáhlých experimentálních programů se jeví jako nejvýhodnější konstrukčně-technologické provedení, viz obrázky 9, kde je navrženo výsledné řešení, které snižuje tyto faktory:

- *eliminace materiálového faktoru* – použití svarového kovu Sv-07Ch25N13,
- *eliminace napěťového faktoru* – použitím lokálního zesílení s přechodovými návary EA-395/9 a EA-400/10T [8],
- *eliminace faktoru prostředí* – dílenské podmínky a obrobení vnitřní strany.



SESTAVA (1:2)



Obr. 9 Návrh nejvhodnějšího materiálově a konstrukčně-technologického řešení heterogenního svarového spoje nátrubků N6 parogenerátoru VVER 1000, návrh použitelný od DN 50 do DN 250 pro projekt typu VVER 440 a VVER 1000

## 5. ZÁVĚR

Životnost heterogenních svarových spojů ocelí v klasické a jaderné energetice je stěžejním parametrem pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení elektráren. Cílem bylo stanovení možných způsobů zvyšování životnosti heterogenních svarových spojů v klasické a jaderné energetice včetně stanovení způsobů predikce jejich životnosti založených na provedení a hodnocení mikrotvrdosti (HV0,1). Dosažení takto vytyčených hlavních cílů práce bylo postaveno na provedení logicky navazujících dílčích cílů.

Pro experimentální program svarových spojů uhlíkových elektráren byl jako zástupce zvolen spoj složený z atypické kombinace ocelí 15CH1M1F–P91. Výsledky výzkumu a vývoje provedeného pro heterogenní svarový spoj 15CH1M1F–P91, kdy byla prokázána shoda výsledků získaných výpočtovou metodou CALPHAD s výsledky provedených destruktivních zkoušek, ukazují, že pro heterogenní svarové spoje ocelí bez referenčního použití je vhodné využít fázové modely stanovené metodou CALPHAD pro potvrzení vhodnosti volby přídatných materiálů při návrhu nových konstrukčně-technologických provedení heterogenních svarových spojů. Cílem těchto numerických simulací je zajištění vyhnutí se nestabilním strukturním fázím ocelí. Kromě toho bylo studováno dlouhodobé chování heterogenního svarového spoje s využitím urychleného umělého stárnutí a creepových zkoušek jako simulace degradačních procesů probíhajících ve svařovaných parovodních materiálech za provozních teplot, tj. při 540 °C. Následný mikrostrukturní rozbor a podrobné měření chemického složení přes difúzi ovlivněné oblasti potvrdil, že kromě procesu tvorby creepové kavitace a popouštění bainitické, resp. martenzitické struktury zde dochází k postupné redistribuci intersticiálního uhlíku. Ta pak způsobuje výrazné hrubnutí oduhlíčených zrn v blízkosti obou linií ztavení. V těchto místech pak dochází k výraznému poklesu pevnostních charakteristik a k postupné ztrátě původní žáropevnosti.

Pro účely experimentálního programu v oblasti jaderné energetiky byl zvolen heterogenní svarový spoj ocelí 22K–08Ch18N10T, který je typickým reprezentantem svarového spoje v sekundárním okruhu jaderných elektráren typu VVER 440 a VVER 1000 MW. V případě těchto svarových spojů pracujících do teploty 350 °C dochází vlivem působení hlavních přispěvatelů, tedy materiálu, napětí a prostředí, k iniciaci a rozvoji poškození svarových spojů degradačním mechanismem v podobě korozního praskání pod napětím.

Za účelem eliminace poškození heterogenních svarových spojů uvedeným degradačním mechanismem byla popsána různá konstrukčně-technologická

provedení heterogenních svarových spojů umožňující eliminaci jednotlivých přispěvatelů. Na základě výsledků a konstrukčně-technologických provedení bylo navrženo řešení, které kombinuje výhody jednotlivých provedení tak, aby bylo maximálním způsobem dosaženo snížení vlivů jednotlivých přispěvatelů. Toto provedení je uvedeno na obrázku 9 a umožňuje zhotovení heterogenních svarových spojů v dílenských podmínkách s obrobem vnitřního povrchu svarového spoje.

Z pohledu predikce životnosti heterogenních svarových spojů, ať už v oblasti klasické, nebo jaderné energetiky, lze na základě detailního teoretického rozboru konstatovat, že pro hodnocení kvalitativních předpokladů, s ohledem na náchylnost k poškozování vlivem působení degračních mechanismů, je vhodnou alternativou zkouška tvrdosti (HV10) ve smyslu ČSN EN ISO 9015-1, resp. mikrotvrdosti (HV0,1) ve smyslu ČSN EN ISO 9015-2. V návaznosti na skutečnost, že pro hodnocení kvality homogenních svarových spojů jsou definovány požadavky pro provádění a hodnocení zkoušek tvrdosti v normách ČSN EN ISO 15614-1 a ČSN EN ISO 9015-1, ale pro heterogenní svarové spoje neexistuje žádný předpis pro provádění a hodnocení zkoušek tvrdosti a mikrotvrdosti, byl v rámci jednoho z cílů této práce vytvořen návrh Přílohy B k normě ČSN EN ISO 9015-2 pro provádění a hodnocení zkoušek mikrotvrdosti (HV0,1) u heterogenních svarových spojů. Tento návrh byl zpracován na základě předchozích výsledků výzkumných a vývojových prací, viz obrázek 8.

V návrhu je respektováno fázové rozdělení ocelí a rozdělení ocelí do skupin definovaných v rámci TNI CEN ISO/TR 15608, je zohledněn i fakt, že v případě vyhodnocení zkoušky mikrotvrdosti není stěžejním kritériem samotná hodnota mikrotvrdosti pro jednotlivé vtisky, ale gradient mikrotvrdosti v linii ztavení a její těsné blízkosti (kritérium sousedních hodnot  $\leq 100HV0,1$  je přípustné). Hodnota gradientu mikrotvrdosti by měla být obecně nízká, tak aby zaručovala, že nedochází v oblasti linie ztavení k tvorbě lokálních heterogenit materiálových vlastností, které se následně projeví zvýšenou náchylností k působení degračních mechanismů. Uvedený návrh přílohy normy bude předložen Komisi pro zpracování a revize NTD A.S.I., Sekce V – Zkoušky materiálů k posouzení a zařazení do této Sekce za účelem provádění a hodnocení zkoušek mikrotvrdosti heterogenních svarových spojů v oblasti jaderné energetiky a dále bude návrh předložen CEN pro posouzení návrhu a jeho zařazení k normě ČSN EN ISO 9015-2.

## 6. PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTACE

### Publikace v databázích WOS a SCOPUS

- DUCHÁČEK, P., JANOVEC, J. Heterogeneous Welded Joints (T23-T92; 15CH1M1FP91). In: Contribution of Metallography to Solving Production Problems. TransTech Publications Ltd, 2015, vol. 647, p. 147–152. Key Engineering Materials. Dostupné z DOI: <https://www.scientific.net/KEM.647.147>
- JUNEK, M., SVOBODOVÁ, M. JANOVEC, J. HORVÁTH, J. DUCHÁČEK, P. Long-term thermal degradation of narrow gap orbital welded P91 and P92 steels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 185, 2020, 104133, ISSN 0308-0161. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijvp.2020.104133>

### Indexované a ostatní publikace

- DUCHÁČEK, P. JANOVEC, J. POLÁCHOVÁ, D. HÁJKOVÁ, P. Heterogenní svarové spoje (T23-T92; 15CH1M1F-P91). In: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. 8. konference, 22. 10. 2013 - 24. 10. 2013, Srní : Západočeská univerzita v Plzni, 2013, s. 59–64. ISBN 978-80-261-0272-4
- DUCHÁČEK, P., JANOVEC, J. Dokumentace heterogenních svarových spojů oceli 15CH1M1F-P91. Praha, 2013 [13 s.]. Výzkumná zpráva č. 2-13
- DUCHÁČEK, P. JANOVEC, J. POLÁCHOVÁ, D. JUNEK, M. Mechanické (a creepové) vlastnosti heterogenních svarových spojů (T23-T92; 15CH1M1F-P91). In: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. 9. konference, 21. 10. 2014 - 23. 10. 2014, Srní : Západočeská univerzita v Plzni, 2014, s.70–80. ISBN 978-80-261-0406-3
- DUCHÁČEK, P. PALÁN, M. ČANČURA, Z. Heterogenní svarové spoje parních generátorů JE typu VVER 1000 MW zhotovené přídavným svařovacím materiálem typu Sv-10Ch16N25AM6. In: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. 12. konference, 17. 10. 2014 - 19. 10. 2017, Srní : Západočeskáuniverzita v Plzni, 2017, s. 63–66. ISBN 978-80-261-0741-5
- DUCHÁČEK, P. PALÁN, M. ČANČURA, Z. Degradaci poškození heterogenních svarových spojů feriticko-perlitických ocelí 12022.1/22K s austenitickou korozivzdornou ocelí 08Ch18N10T a přídavným materiálem Sv-10Ch16N25AM6. In: Zborník prednášok z konferencie Národné dni zvarovania 2018. Výzkumný ústav zvaračský - Priemyselný inštitút SR, 2018
- BALIZA, M. DUCHACEK, P. EFSING, P. FAZEKAS, F. FREDERICK, G. et al. Dissimilar Metal Weld Inspection, Monitoring and Repair Approaches. Austria: IAEA, 2018. TECDOC Series, no. 1852. isbn 978-92-0-105618-4. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/13387/dissimilar-metal-weld-inspection-monitoring-and-repair-approaches>
- DUCHÁČEK, P. PALÁN, M. ČANČURA, Z. Orbitální svařování heterogenních svarových spojů oceli 12022.1 a 08Ch18N10T přídavným materiálem Sv-07Ch25N13. In: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení



v elektrárnách. 13. konference, 16. 10. 2018 - 18. 10. 2018, Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2018, s. 95–98. ISBN 978-80-261-0794-1

• DUCHÁČEK, P. a kol. Experimentální program na vybraných vyjmutých heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2. HVB. Temelín: SK zvláštní procesy a TK strojní JE, ČEZ, a. s., 2016. Archivní č. DU001

### Seznam použité literatury v tezích

- [1] *Státní energetická koncepce České republiky* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, Department 32400, 2015-08-06 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52841/60959/636207/priloha006.pdf>
- [2] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2018: Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, Oddělení statistiky a sledování kvality, 2019 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c](http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c)
- [3] SOPOUŠEK, J. Termodynamická a difúzní stabilita heterogenního svarového spoje 15CrMoV5-10 – X10CrMoVNb9-1 (P91): Část I. Presentace výsledků. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, 2010. [Výzkumná interní zpráva UJP PRAHA, a. s.]
- [4] SVOBODOVÁ, M. Strukturální stabilita modifikované žáropevné oceli za zvýšených teplot. Praha, 2011. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10467/8051>, Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra materiálů. Vedoucí disertační práce Jiří Kunz.
- [5] SMIRNOVA, A. P.; MINTS, I. I.; SHTEINBERG, M. M. Properties of steel 15Kh1M1F in relation to the structural condition. *Metal Science and Heat Treatment*. p. 145–149. ISSN 1573-8973. Dostupné z DOI: [10.1007/BF00700946](https://doi.org/10.1007/BF00700946).
- [6] BYSTRIANSKÝ, J. Možnosti ochrany heterogenního svarového spoje před účinkem vodního prostředí zařízení JE VVER. [interní prezentace 13. října 2020]. VŠCHT Praha.
- [7] BYSTRIANSKÝ, J. a kol. Podmínky dlouhodobé životnosti svarových spojů v energetických zařízeních – vliv pracovního prostředí. In: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. 14. konference, 24. 09. 2019 - 26. 09. 2019, Srní : Západočeská univerzita v Plzni, 2019, s. 81–97. ISBN 978-80-261-0885-6.
- [8] SUCHÁNEK, O. Základní předpisy pro svařování a navařování uzlů konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů OP 1513-72. Praha: Ústřední informační středisko pro jaderný program, 1976. Zbraslav 516, 255 45 Praha.

## ANOTACE

Životnost heterogenních svarových spojů v oblasti klasické a jaderné energetiky je stěžejním parametrem pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení elektráren. Práce se zabývá hodnocením dvou konstrukčně-technologických typů svarových spojů, kde životnost každého typu spoje je ovlivňována působením odlišných degradačních mechanismů. Detailně jsou popsány dominantní degradační mechanismy působící na oba typy spojů. V případě uhelných elektráren se jedná o creep poškozování, které je urychlováno difúzními procesy při teplotách výrazně nad 350 °C. U jaderných elektráren se jedná o korozní poškozování, kdy maximální provozní teploty dosahují 350 °C. Zohledněny jsou i další aspekty ovlivňující životnost svarových spojů z pohledu materiálového, konstrukčního, technologického a provozních parametrů. Pro účely experimentálního programu je jako zástupce svarových spojů uhelných elektráren zvolen spoj složený z atypické kombinace ocelí 15CH1M1F–P91. Další část práce je věnována typickému zástupci heterogenních svarových spojů v oblasti sekundárních okruhů jaderných elektráren zhotovenému z ocelí 22K–08Ch18N10T. Hodnocení životnosti heterogenních svarových spojů obou typů je provedeno řadou analytických a experimentálních metod, jejichž výsledky uceleným způsobem poskytují informace o iniciaci a rozvoji důsledků působení degradačních mechanismů.

## SUMMARY

The service life of dissimilar metal joints in the field of conventional and nuclear energy is a key parameter for ensuring safe and reliable operation of power plant equipment. The thesis deals with the evaluation of two construction-technological types of welded joints, where the service life of each type of joint is influenced by the action of different degradation mechanisms. The dominant degradation mechanisms acting on both types of joints are described in detail. In the case of coal-fired power plants, this is creep damage, which is accelerated by diffusion processes at temperatures well above 350 °C. In nuclear power plants, this is corrosion damage, where the maximum operating temperatures reach 350 °C. Other aspects influencing the service life of welded joints from the point of view of material, construction, technological and operating parameters are also taken into account. For the purposes of the experimental program, a joint composed of an atypical combination of 15CH1M1F–P91 steels is chosen as a representative of welded joints of coal-fired power plants. Another part of the thesis deals with a typical representative of dissimilar metal joints in the field of secondary circuits of nuclear power plants made of 22K–08Ch18N10T steel. The evaluation of the service life of dissimilar metal joints of both types is performed by a number of analytical and experimental methods, the results of which provide information about the initiation and development of the consequences of degradation mechanisms in a comprehensive manner.