

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Milan Jarý

**VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ PROCESU SVAŘOVÁNÍ A
TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELÍ S VYUŽITÍM ELASTO-
VISKOPLASTICKÉHO MODELU MATERIÁLU**

COMPUTATIONAL MODELLING OF WELDING AND HEAT
TREATMENT PROCESS OF STEEL WITH APPLICATION OF
ELASTIC-VISCOPLASTIC MATERIAL MODEL

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: Ing. Lubomír Junek, Ph.D.
Oponenti: Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
Ing. Petr Dymáček, Ph.D.

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

numerické analýzy svařování, elasto-viskoplastický model materiálu, zbytková napjatost, SYSWELD, Weld overlay

KEY WORDS

welding numerical analyses, elastic-viscoplastic material model, residual stresses, SYSWELD, Weld overlay

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

© Milan Jarý, 2013

Obsah

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 ÚVOD | 4 |
| 1.1 Význam disertační práce | 5 |
| 1.2 Cíle disertační práce | 5 |
| 2 VÝPOČET ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI VE SVAŘOVÁNÍ A TZ..... | 7 |
| 2.1 Mechanicko-strukturní analýza - EVP přístup | 9 |
| 2.1.1 Porovnání EP a EVP modelu materiálu | 9 |
| 2.1.2 Význam použití EVP modelu materiálu..... | 11 |
| 2.1.3 Typy EVP modelů materiálu..... | 13 |
| 2.1.4 Měření a vyhodnocení mechanických vlastností materiálu pro EVP analýzu..... | 14 |
| 3 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM | 16 |
| 3.1 Návrh a realizace modelových svarových spojů | 16 |
| 3.2 Provedení mechanických zkoušek materiálů modelového svarového spoje | 16 |
| 4 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY..... | 17 |
| 5 NUMERICKÉ ANALÝZY | 17 |
| 5.1 Testovací analýzy | 17 |
| 5.2 Verifikační analýzy..... | 18 |
| 5.3 Použití EVP modelu materiálu v praktických aplikacích | 18 |
| 5.3.1 Příklad výsledků mechanicko-strukturních analýz návrhu WOL | 18 |
| 6 SHRUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ | 20 |
| 7 PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE A DALŠÍ VÝVOJ..... | 24 |
| 8 ZÁVĚR | 25 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 26 |
| SEZNAM VYBRANÝCH VLASTNÍCH PUBLIKACÍ VZTAHUJÍCÍCH SE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE | 30 |
| PROJEKTY ŘEŠENÉ DOKTORANDEM | 30 |
| CURRICULUM VITAE | 31 |
| ABSTRAKT | 32 |

1 ÚVOD

Práce se zabývá problematikou výpočtového modelování procesu svařování a tepelného zpracování (TZ) se zahrnutím viskózních efektů (creep, relaxace) pomocí vhodných konstitutivních modelů materiálu a jejich vlivem na predikovanou deformačně-napěťovou odezvu v podobě zbytkových napětí. Dále pak pojednává o možnostech experimentální verifikace zbytkové napjatosti pomocí dostupných metod.

Při svařování a tepelném zpracování vždy dochází ke vzniku zbytkového napětí ve svarovém spoji a jeho okolí. Jedním z požadavků na kvalitu svarových spojů strojních součástí, zvláště pro součásti v energetickém průmyslu, je dodržení předepsané úrovně zbytkového napětí. Průběhy a hodnoty zbytkových napětí mohou být důležitým vstupním parametrem pro následné posouzení. Těmi jsou například hodnocení životnosti svařovaných konstrukcí (únava materiálu, lomově-mechanické posouzení) nebo optimalizace doby výdrže při tepelném zpracování atd. Proto je důležité co nejlépe (přiblížit se reálným podmínkám svařování a tepelnému zpracování) výpočtově modelovat proces svařování a tepelného zpracování s použitím správného popisu probíhajících fyzikálních procesů.

Pro výpočet zbytkových napětí v průběhu a po svařování se nyní nejčastěji používají zejména následující typy konstitutivních modelů materiálu. Prvním je elasto-plastický (EP) model materiálu s izotropním zpevněním, dalším je EP model materiálu s kinematickým zpevněním a třetím může být kombinace obou výše zmíněných modelů materiálu. Tyto modely materiálu nezohledňují viskoplastické, časově závislé deformační procesy materiálu, které v průběhu svařování a tepelného zpracování nastávají. Zanedbání těchto procesů při výpočtovém modelování může vést k nereálně vysokým hodnotám predikovaných zbytkových napětí ve svarovém spoji a jeho blízkém okolí. Z tohoto důvodu je zapotřebí tyto viskoplastické procesy zohlednit použitím elasto-viskoplastického (EVP) modelu materiálu.

Disertační práce si klade za cíl aplikovat EVP modely materiálu v rámci výpočtového modelování procesu svařování a tepelného zpracování. Nejprve u testovacích a verifikačních numerických analýz s cílem zjistit vliv a přínos ve srovnání s EP modelem materiálu a následně použít získané poznatky při řešení praktických průmyslových úkolů na ÚAM Brno. Práce bude navazovat na disertační práce [3], [4] a nejnovější publikované vědecké poznatky v ČR i ve světě.

1.1 VÝZNAM DISERTAČNÍ PRÁCE

V současné době se pro výpočet zbytkové napjatosti po svařování používají zejména EP modely materiálu s izotropním, kinematickým nebo kombinovaným modelem deformačního zpevnění. Ty nezohledňují viskoplastické, časově závislé deformační procesy materiálu, které v průběhu svařování nastávají. Aplikace pouze EP modelů materiálu se v rámci predikce zbytkové napjatosti ve svařování ospravedlňuje tím, že na formování zbytkových napětí má rozhodující vliv oblasti nižších teplot přibližně pod $0.5 T_T$, kde dochází k nárůstu hodnot mechanických vlastností materiálu a kde by měl být vliv viskózních efektů zanedbatelný. Ovšem na druhou stranu je zapotřebí vzít v potaz celou deformačně napěťovou historii procesu svařování. To znamená, že výsledná zbytková napjatost po ochlazení může být ovlivněna viskoplastickými procesy při vysokých teplotách (cca nad 0.3 až $0.5 T_T$). To se týká zejména simulace vícevrstvého svařování (podle [1] by v tomto případě mělo být přínosné použití EVP modelu materiálu), které je zároveň nejčastějším reprezentantem praktických úloh. Dále je důležité poznamenat, že EP model materiálu není schopen zohlednit vliv rychlosti přetvoření na výslednou hodnotu meze kluzu materiálu ve fázi ohřevu a chladnutí [2]. To je možné korektně provést pouze v rámci EVP analýzy. Zanedbání viskoplastických procesů při výpočtovém modelování může vést k nereálně distribuovaným a vysokým hodnotám predikovaných zbytkových napětí ve svarovém spoji, což přímo i nepřímo potvrzují publikace [4, 20, 46]. Proto by mělo být přínosné tyto fyzikální procesy zohlednit vhodnou aplikací EVP modelu materiálu a tím zajistit, větší shodu výsledků s reálnými podmínkami svařování. Ty, jak již bylo řečeno, vstupují do dalšího posouzení a přímo rozhodují o bezpečnosti a životnosti svařovaných konstrukcí.

1.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je zlepšit výpočtové přístupy predikce zbytkové napjatosti u svarových spojů svařovaných konstrukcí. Cílem je dosažení reálnějšího popisu rozložení a hodnot zbytkové napjatosti po svařování a tepelném zpracování pomocí numerických analýz v přijatelném výpočtovém čase. Zlepšení výpočtových přístupů spočívá v aplikaci EVP modelu materiálu, jehož použitím by mělo dojít k reálnějšímu popisu zbytkové napjatosti ve svarovém spoji analyzované konstrukce. Věrohodnost a správnost výsledků získaných výpočtovým modelováním bude ověřena jednak vhodným experimentálním měřením a dále pak porovnáním vypočtených výsledků s výsledky publikovanými ve světě. Závěry a výsledky disertační práce budou dále přímo použitelné pro řešení skutečných případů svařovaných konstrukcí a komponent řešených na ÚAM Brno.

Dílčí cíle jsou dle [22] následující:

- 1) Navrhnout (popřípadě zavést potřebná zjednodušení), provést a vyhodnotit vhodná experimentální měření vstupních charakteristik pro numerické analýzy s použitím EVP modelu materiálu (creepové a relaxační vlastnosti materiálu).
- 2) Vyvinout metodiku transformace "surových" experimentálních dat na viskoplastické parametry popisující jednotlivé EVP modely materiálu.
- 3) Navrhnout a aplikovat testovací a verifikační výpočtové modely pro numerické analýzy svařování a tepelného zpracování s použitím EVP modelu materiálu.
- 4) Navrhnout, provést a vyhodnotit vhodná experimentální měření zbytkové napjatosti ve svarovém spoji (na reálných tělesech totožných s verifikačními výpočtovými modely) k ověření výsledků numerických analýz a to podle nejnovějších přístupů a metod v oblasti experimentálního zjišťování zbytkových napětí.
- 5) Provést ověření výsledků numerických analýz porovnáním s výsledky publikovanými ve světě.
- 6) Ověřit nutnost používání EVP modelu materiálu při na sebe navazujících numerických analýzách svařování a tepelného zpracování.
- 7) Aplikovat výsledky disertační práce při řešení praktických úkolů na ÚAM Brno.

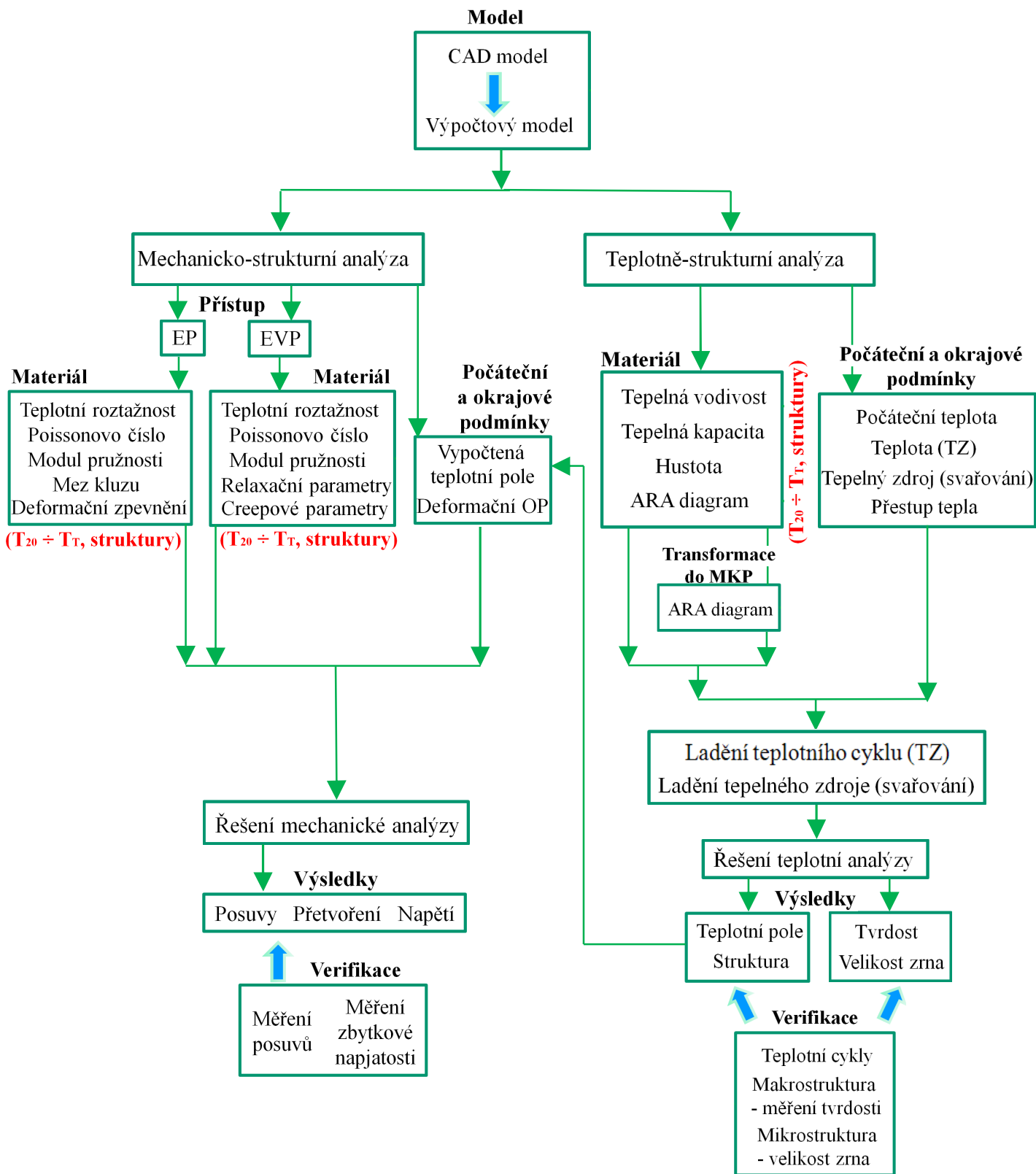
Pozn.: Problematika experimentálního měření zbytkové napjatosti je natolik rozsáhlá, že si zasluhuje provedení samostatného zpracování. Proto bod 4) nemůže být chápán jako stěžejní cíl této disertační práce.

2 VÝPOČET ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI VE SVAŘOVÁNÍ A TZ

V současné době je možné provádět výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování v programu SYSWELD [30], který je založen na metodě konečných prvků (jelikož se jedná o numerickou metodu, pomocí níž lze provádět výpočtové modelování, je v textu používán termín numerická analýza). Program SYSWELD umožňuje simulovat procesy obloukového (MAG, TIG, atd.), bodového a vysokoenergetického (EBW, LBW) svařování a dále tepelného zpracování jako je žíhání, kalení a popouštění. Výhodou programu SYSWELD oproti jiným MKP programům je, že umožňuje provádět výpočet teplotních polí spolu s úplným metalurgickým výpočtem (metalurgická struktura s podílem jednotlivých fází).

Numerické analýzy svařování a tepelného zpracování se skládají ze tří navzájem propojených etap [22]. V první etapě se nadefinuje pomocí speciálního modulu úplný diagram anizotermického (ARA diagram) nebo izotermického (IRA diagram) rozpadu austenitu, který je základem metalurgického výpočtu. V druhé etapě výpočtu se po zadání termofyzikálních vlastností provede teplotní a metalurgický výpočet (teplotně-strukturní analýza), jejichž výsledkem jsou nestacionární teplotní pole, procentuální rozložení metalurgických struktur a velikost austenitických zrn. Speciální částí druhé etapy je možnost výpočtu tvrdosti ve zvolených oblastech na základě empirických vztahů. Výsledky druhé etapy slouží jako přímý vstup do poslední části analýzy, kde se po zadání mechanických vlastností jednotlivých metalurgických struktur v závislosti na teplotě obdrží deformačně-napěťová odezva (mechanicko-strukturní analýza). Ta může být řešena buď s použitím EP modelů materiálu (svařování) nebo EVP modelů materiálu (svařování, TZ).

Schematické znázornění jednotlivých výpočtových kroků numerické analýzy svařování a tepelného zpracování reprezentuje **obr. 2.1**. Popis všech tří etap na základě [1, 3, 20, 22, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36], je uveden v originální verzi disertační práce. Zde je uveden stručný popis EVP výpočtového přístupu.



Obr. 2.1 Schematické znázornění jednotlivých kroků numerické analýzy svařování a tepelného zpracování

2.1 MECHANICKO-STRUKTURNÍ ANALÝZA - EVP PŘÍSTUP

Numerické analýzy svařování a tepelného zpracování se pro výpočet deformační a napěťové odezvy s použitím EVP modelu materiálu skládají ze tří navzájem propojených etap, stejně jako v případě EP výpočtu. Ovšem ve třetí etapě výpočtu (mechanicko-strukturní výpočet) je již nutné brát v potaz rozdílnou metodiku řešení pomocí EVP přístupu.

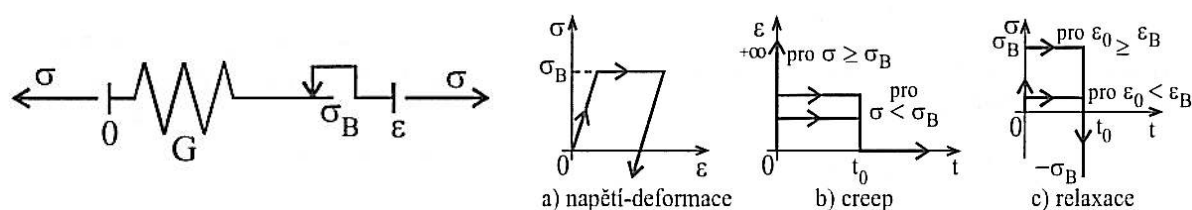
2.1.1 Porovnání EP a EVP modelu materiálu

Před vlastním porovnáním EP a EVP modelu materiálu je důležité vymežit pojmy creep a relaxace materiálu [32, 33] a poznamenat, že fyzikální podstaty creepu a relaxace jsou stejné. Vlastní porovnání EP a EVP modelu materiálu bude provedeno na základě jednoduchých reologických modelů a celkového přetvoření.

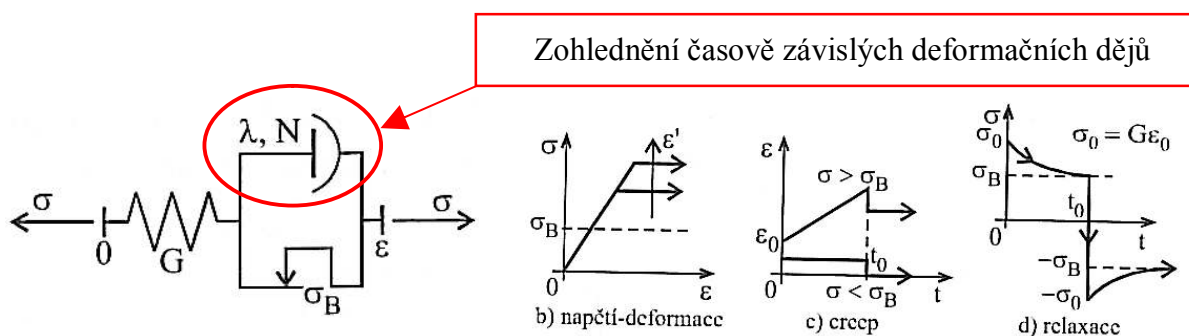
Creep (tečení materiálu) - je proces, při kterém v zatíženém tělese dochází k nárůstu přetvoření (deformace) v čase, při konstantním napětí (zatížení), přičemž tento nárůst zůstává zachován i po odlehčení tělesa. Jde tedy o přetvoření plastické.

Relaxace napětí - je proces, při kterém v zatíženém tělese dochází k poklesu napětí při konstantním přetvoření (deformaci), přičemž při návratu k původní nedeformované konfiguraci tělesa v něm vzniknou napětí opačného smyslu, které velikostí odpovídají předcházejícímu poklesu a následně v čase opět klesají (relaxují) na nulovou hodnotu.

Schematické znázornění fyzikálních principů jednotlivých modelů materiálu pomocí jednoduchých reologických modelů [32] je uvedeno na **obr. 2.1.1.1** a **obr. 2.1.1.2**.



Obr. 2.1.1.1 Základní charakteristiky elasto-plastické látky



Obr. 2.1.1.2 Základní charakteristiky elasto-viskoplastické látky

G – modul pružnosti ve smyku [MPa]

σ_B – blokovací napětí, zde je hodnota blokovacího napětí rovna Re [MPa]

λ, N – parametry popisující Nortonův kapalinový nelineární tlumič

σ_0 – počáteční napětí, které v závislosti na čase relaxuje na napětí $\sigma_B = Re$ [MPa]

Celkové přetvoření jednotlivých modelů materiálu v notaci pro použití v MKP programu SYSWELD je popsáno níže uvedenými vztahy. Vztah (7) je totožný se vztahem (4.3.6) uvedeným v kapitole 4.3. Zde je znovu uveden z důvodu vzájemného porovnání obou modelů materiálu.

Celkové přetvoření – EP model materiálu

$$\varepsilon_T = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{tp} \quad (7)$$

Celkové přetvoření - EVP model materiálu

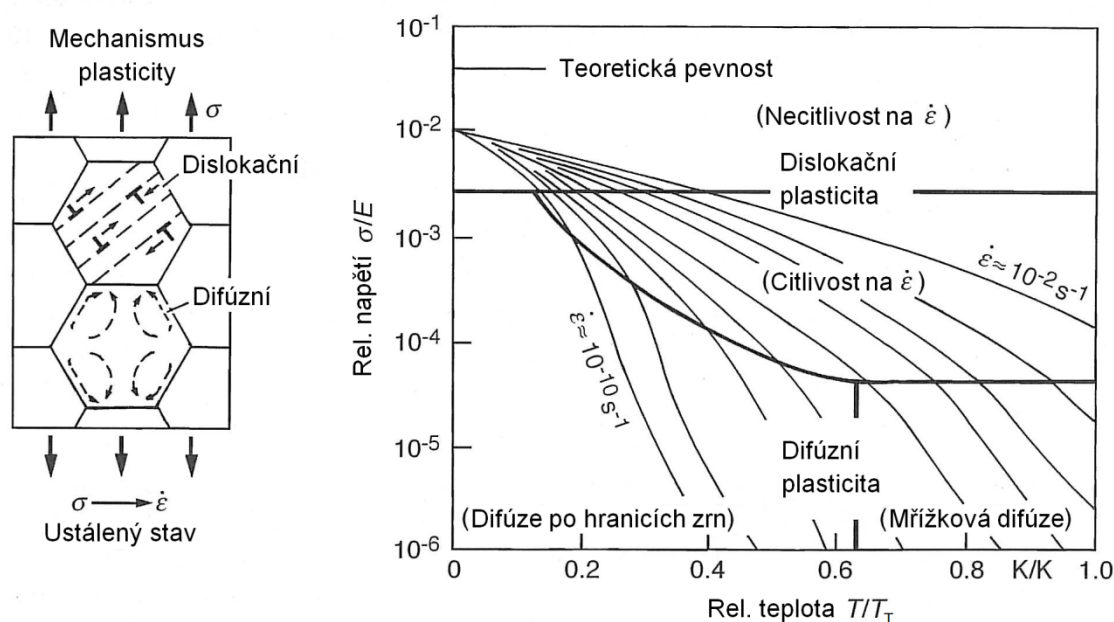
$$\varepsilon_T = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} + \varepsilon^{vp} + \varepsilon^{tp} \quad (8)$$

kde: ε_T – celkové přetvoření [-]
 ε^{el} – elastická složka přetvoření [-]
 ε^{th} – teplotní složka přetvoření (volumetrická část přetvoření) [-]
 ε^{pl} – plastická časově nezávislá složka přetvoření (deviátorová část přetvoření) [-]
 ε^{vp} – viskoplastická časově závislá složka přetvoření (deviátorová část přetvoření) [-]
 ε^{tp} – transformační plasticita (deviátorová a volumetrická část přetvoření) [-]

Jak je patrné ze vztahů (7) a (8) popisujících celkové přetvoření jednotlivých modelů materiálu a ze vzájemného porovnání na základě jednoduchých reologických modelů, rozdílem mezi EP a EVP modelem materiálu je viskoplastická časově závislá složka deformace ε^{vp} . Ta je v reologickém modelu elasto-viskoplastické látky znázorněna pomocí Nortonova kapalinového nelineárního tlumiče. Z tohoto porovnání je vidět, že EP model materiálu není schopen zohlednit časově závislé deformační procesy v materiálu, které při skutečném procesu svařování probíhají. Naproti tomu EVP model materiálu je již schopen časově závislé deformační procesy v materiálu zohlednit a tím přispět k reálnějšímu popisu zbytkové napjatosti ve svarovém spoji.

2.1.2 Význam použití EVP modelu materiálu

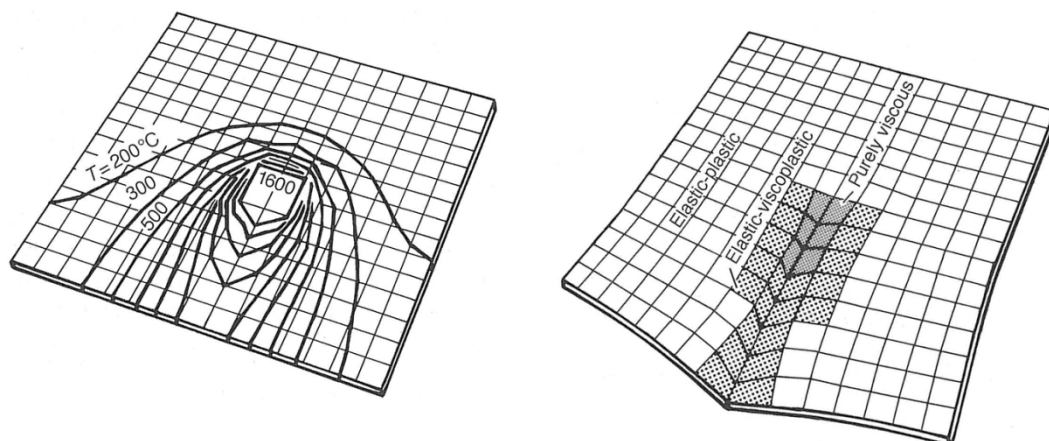
Touto problematikou se podrobně zabývá publikace [2], uvedená v kapitole 2.1 a dále literatura [1], stručně diskutovaná v následujícím textu. Mikrostrukturní mechanismus plastického přetvoření zahrnující viskózní efekty může být znázorněn a kvantifikován pomocí diagramu na **obr. 2.1.2.1** [1]. Ten znázorňuje průběh ustálené rychlosti plastického přetvoření v závislosti na úrovni napětí (normalizované modulem pružnosti při pokojové teplotě) a teplotě (normalizované teplotou tavení materiálu). Je třeba poznamenat, že existuje několik mikrostrukturních deformačních mechanismů, které jsou dominantní při rozdílných napěťových a teplotních poměrech dle diagramu. Z diagramu je např. patrné, že hodnota napětí nezbytného pro dosažení určité rychlosti přetvoření rychle stoupá s klesající teplotou a že při pokojové teplotě téměř vymizí rozdíl mezi různými rychlostmi přetvoření. Plastické přetvoření s uvažováním viskózních efektů je tedy způsobeno vzájemnou interakcí dislokačního a difúzního mechanismu, kde vliv každého z nich závisí na aktuálních napěťových a teplotních podmínkách. EP model materiálu zohledňuje plastické deformační chování materiálu, které je nezávislé na rychlosti přetvoření, a tím je i nezávislé na čase. Na rozdíl od EP modelu materiálu je EVP model materiálu schopen zohlednit plastické chování materiálu, které je závislé na rychlosti přetvoření a tím i na čase potřebném pro přetvoření. V rámci procesu svařování jsou významné rychlosti přetvoření v rozsahu $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.



Obr. 2.1.2.1 Popis vlivu viskoplastických efektů pomocí mapy deformačních mechanismů

Teoreticky lze použití jednotlivých modelů materiálu v závislosti na teplotě rozdělit do tří oblastí dle **obr. 2.1.2.2** [1] (rozdílné aplikované konstitutivní rovnice).

EP chování je možné předpokládat v teplotním rozsahu $T < 0.5T_T$, EVP chování v rozsahu $0.5 T_T < T < 0.8 T_T$ a čistě viskózní chování pro teploty $T > 0.8 T_T$.



Obr. 2.1.2.2 Teoretické oblasti použití jednotlivých konstitutivních modelů materiálu v závislosti na teplotě

Někteří autoři zastávají názor, že by mělo být dostačující provádět výpočet zbytkových napětí po svařování s použitím EP modelů materiálu. V této souvislosti jsou uvažovány jako rozhodující procesy probíhající v teplotním intervalu přibližně do poloviny teploty tavení materiálu. V tomto intervalu teplot dosahuje mez kluzu materiálu dostatečně vysokých hodnot a vliv rychlosti přetvoření by měl být zanedbatelný. Jiní autoři na druhou stranu předpokládají přínos aplikace konstitutivních modelů materiálu zohledňujících viskoplastické efekty. Zejména v případě simulace vícevrstvého svařování (násobné tepelné ovlivnění svarového spoje) nebo simulací procesů tepelného zpracování (dlouhý čas setrvání na teplotě) by mělo být přínosné provádět výpočet zbytkových napětí s uvažováním relaxačních a creepových procesů vhodnou aplikací EVP modelu materiálu. Dalším případem možné aplikace EVP modelu materiálu je oblast vysokých teplot $T > 0.5T_T$. Ta by měla mít menší význam z hlediska formování zbytkové napjatosti, protože zde dochází k poklesu mechanických vlastností materiálu. Ovšem na druhou stranu je tato oblast významná vzhledem ke vzniku tzv. „horkých trhlin“, pro které je rychlost přetvoření za vysokých teplot (blízkých T_T) rozhodujícím faktorem.

V předchozím textu je diskutována problematika aplikace EP a EVP modelů materiálu především z pohledu [1]. Podle mého názoru je „teoreticky“ možné provést rozdělení oblastí aplikace jednotlivých modelů materiálu podle **obr. 2.1.2.2**, ale „prakticky“ se jednotlivé oblasti navzájem více či méně ovlivňují. To znamená, že v rámci numerických analýz svařování by měla být výsledná zbytková napjatost dána interakcí procesů probíhajících jak v teplotním intervalu $T < 0.5T_T$, tak i v intervalu $T > 0.5T_T$ a to především v případě vícevrstvého svařování. Numerické analýzy TZ nelze provádět jinak než s použitím EVP modelu materiálu.

EVP model materiálu by měl být tedy použit v následujících případech:

- Predikce horkých trhlin – průběh svařovacího procesu s ohledem na aktuální deformačně-napěťový stav
- Predikce zbytkové napjatosti – po vícevrstevném svařování (bez následného tepelného zpracování) s ohledem na celou deformačně-napěťovou historii procesu svařování (výsledná zbytková napjatost po ochlazení by mohla být ovlivněna viskoplastickými efekty při vysokých teplotách)
- Predikce zbytkové napjatosti – po tepelném zpracování nebo tepelném zpracování po svařování

Vzhledem k tomu, že dle kap. 1.2 je cílem disertační práce predikce zbytkové napjatosti po svařování a TZ (zejména tepelné zpracování ke snížení zbytkových napětí po svařování), nezabývá se práce problematikou horkých trhlin při svařování.

2.1.3 Typy EVP modelů materiálu

Podle literatury [2, 30, 36] je nutné rozeznávat dva typy EVP modelů materiálu. Prvním z nich je Leblondův EVP model materiálu (dále v textu označovaný jako model č. 21), popsáný pomocí čtyř parametrů (12). Tato rovnice popisuje viskoplastické efekty za předpokladu izotropního deformačního zpevnění. Primárně je využitelný pro numerické analýzy svařování, ale lze jej také aplikovat i v případě analýz tepelného zpracování a to i s možností zahrnutí fázových transformací. Druhým je EVP model materiálu navržený dle Bru (dále v textu označovaný jako model č. 31), popsáný 5 parametry (13, 14). Tento model materiálu je použitelný pouze v případě numerických analýz tepelného zpracování bez možnosti zahrnutí fázových transformací.

a) EVP model materiálu - Leblond model

$$\left. \begin{array}{l} \dot{\varepsilon}^{eq} = \left(\frac{\sigma^{eq} - \sigma^y}{K (\varepsilon^{eff})^{\frac{1}{M}}} \right)^N \\ \text{respektive} \\ f = \sigma^{eq} - \sigma^y - K (\varepsilon^{eff})^{1/M} (\dot{\varepsilon}^{eq})^{1/N} = 0 \end{array} \right\} \text{V závislosti na } T, P \quad (12)$$

kde: $\dot{\varepsilon}^{eq}$ - rychlost redukovaného (von Mises) viskoplastického přetvoření [1/s]

σ^{eq} - redukované napětí (von Mises) [MPa]

ε^{eff} - parametr deformačního zpevnění (aktuálního viskoplastického přetvoření) [-]

σ^y - relaxační napětí ("viskoplastická mez kluzu") [MPa]

K - koeficient zpevnění [MPa]
M - exponent zpevnění [-]
N - exponent rychlosti přetvoření [-]

b) EVP model materiálu - Bru model

$$\dot{\varepsilon}_0 = K \cdot (\sigma)^n \quad (13)$$

$$\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{vp}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} + \left(\frac{3 \cdot H \cdot \dot{\varepsilon}^{vp}}{2 \cdot C} \right)^{\frac{1}{P}} = \sigma \Rightarrow \dot{\varepsilon}^{vp} \quad (14)$$

} V závislosti na T, P

kde: $\dot{\varepsilon}_0$ - počáteční rychlost přetvoření - primární část creepové křivky [1/s]
 $\dot{\varepsilon}^{vp}$ - rychl. viskoplastického přetvoření - primární a sekundární část creep. křivky [1/s]
 σ - vypočtené napětí [MPa]
K - koeficient zpevnění [MPa]
n - exponent rychlosti přetvoření [-]
H, C, P - viskoplastické parametry popisující deformační zpevnění a následné zotavení v průběhu sekundárního creepu [-]

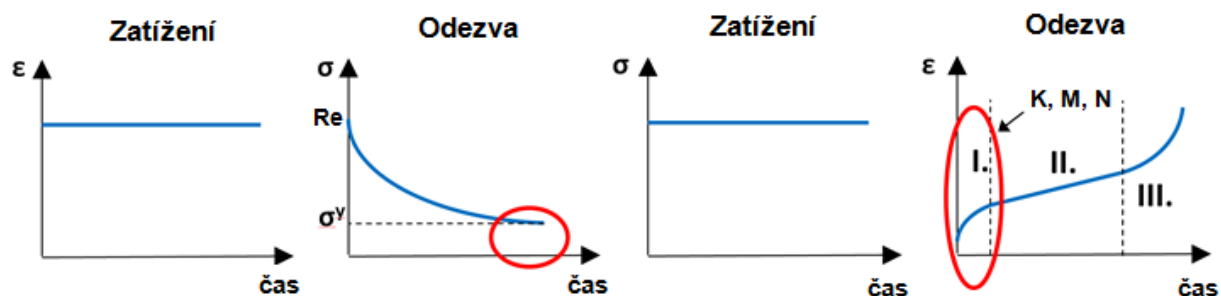
2.1.4 Měření a vyhodnocení mechanických vlastností materiálu pro EVP analýzu

Aby bylo možné získat mechanické vlastnosti materiálu pro EVP analýzu, musí být provedeny krátkodobé relaxační a creepové zkoušky. Z výsledků mechanických zkoušek se pak získají na základě metodiky [2, 34, 35, 36] konkrétní parametry příslušných EVP modelů materiálu, které se zadávají do analýzy. Dále je stručně nastíněna problematika experimentálního měření a následného získání konkrétních parametrů v rámci jednotlivých EVP modelů materiálu.

a) EVP model materiálu č. 21

V EVP analýze nahradí běžnou mez kluzu relaxační napětí σ^y a zpevnění materiálu H je nahrazeno parametry K (koeficient zpevnění), M (exponent zpevnění) a N (exponent rychlosti přetvoření), které také vedle zpevnění popisují i zotavení materiálu v průběhu creepu. Pro získání relaxačního napětí σ^y musí být nejprve provedeny relaxační testy materiálu. Parametr σ^y lze chápat jako ustálenou hodnotu napětí, na kterou toto napětí poklesne z hodnoty konvenční meze kluzu v průběhu relaxačního testu. Parametry K, M, N lze získat z creepových zkoušek, konkrétně z primární a začátku sekundární části creepové křivky. Pro každou teplotu je zapotřebí provést měření min. tří creepových zkoušek pro různá zatížení. Fyzicky lze parametry K, M, N získat ztotožněním experimentální křivky s křivkou

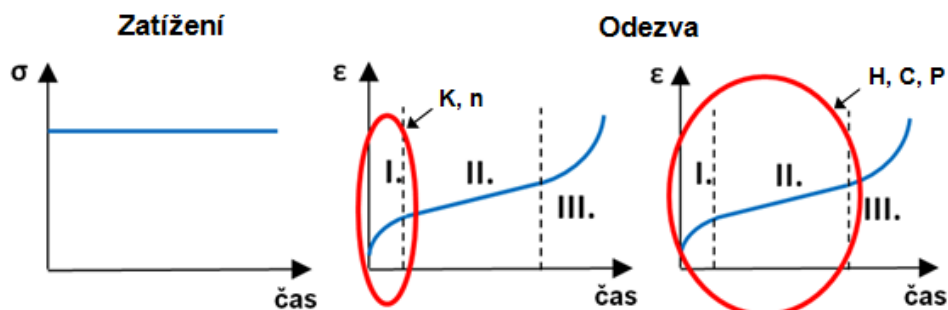
získanou z numerické simulace creepové zkoušky provedené na axisymetrickém výpočtovém modelu (1x1mm). Takto získané parametry se dále verifikují ztotožněním experimentální křivky z tahové zkoušky s křivkou získanou z numerické simulace tahové zkoušky provedené opět na axisymetrickém výpočtovém modelu. Relaxační i creepové zkoušky je obecně možné vykonat v řádu několika hodin. Konkrétní čas zkoušky vždy závisí na typu materiálu. Schematické znázornění relaxační a creepové zkoušky k získání viskoplastických parametrů je na **obr. 2.1.4.1**.



Obr. 2.1.4.1 Schematické znázornění relaxační (vlevo) a creepové (vpravo) zkoušky pro stanovení viskoplastických parametrů

b) EVP model materiálu č. 31

U modelu materiálu č. 31 se v analýze ke standardním EP mechanickým vlastnostem pouze přidají viskoplastické parametry K , n , H , C , P . Ty je možné získat z experimentálního měření pouze creepových charakteristik **obr. 2.1.4.2** (primární i sekundární části creepové křivky). Pro každou teplotu je opět zapotřebí provést měření min. tří creepových zkoušek pro různá zatížení. Koeficienty K a n , jež mají stejný význam jako v modelu č.21, lze získat ztotožněním primární části experimentálně změřené creepové křivky s primární částí křivky z numerické simulace creepové zkoušky provedené na axisymetrickém výpočtovém modelu. Koeficienty H , C a P se obdrží stejným způsobem z primární a sekundární části creepové křivky.



Obr. 2.1.4.2 Schematické znázornění creepové zkoušky s primární (vlevo) a primární a sekundární (vpravo) částí křivky pro stanovení viskoplastických parametrů

3 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Experimentální program navržený na ÚAM Brno se skládal ze dvou na sebe navazujících částí. V první části programu (viz kap. 3.1) byly nadefinovány a provedeny tři stejné modelové svarové spoje (základní materiál P355NL1 a přídatný materiál E 46 6 1 Ni B 42 H5) ve spolupráci s VŠB TUO [39]. Ty sloužily ke vzájemnému porovnání reálného případu svařování a TZ s výpočtovým modelováním pomocí EP a EVP přístupu. Druhá část programu (viz kap. 3.2) zahrnovala provedení mechanických zkoušek ve spolupráci s ÚFM AVČR.

3.1 NÁVRH A REALIZACE MODELOVÝCH SVAROVÝCH SPOJŮ

V rámci experimentu byly připraveny tři totožné modelové svarové spoje (stejná technologie, svařovací parametry, atd.), aby bylo možné provést následující měření:

- Svaření modelového svarového spoje č. 1 - měření teplotních cyklů a stanovení výsledných metalurgických struktur pomocí měření tvrdosti (makrostruktura) a velikosti a charakteru zrna (mikrostruktura)
- Svaření modelového svarového spoje č. 2 - měření zbytkové napjatosti po svařování magnetoelastickou metodou
- Svaření modelového svarového spoje č. 3 s následným TZ - měření zbytkové napjatosti po TZ magnetoelastickou metodou

3.2 PROVEDENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK MATERIÁLŮ MODELOVÉHO SVAROVÉHO SPOJE

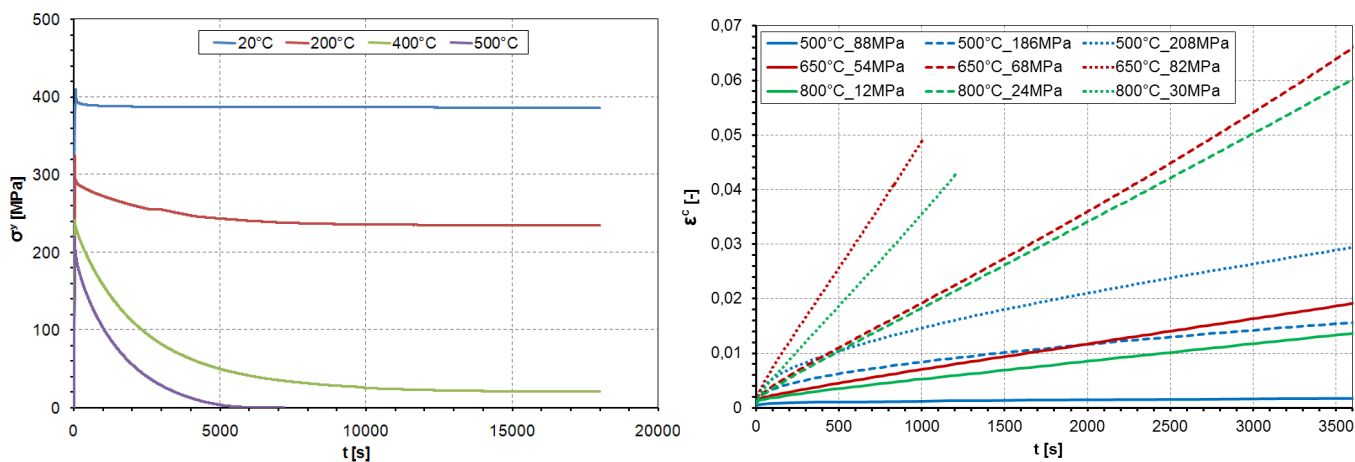
Na základě provedených zkoušek v kap. 3.1 byly stanoveny výsledné metalurgické struktury modelového svarového spoje. U základního materiálu P355NL1 byla zjištěna feriticko-perlitická struktura dále od svarového spoje a převládající bainitická struktura v TOO. V oblasti svarového materiálu E 46 6 1 Ni B 42 H5 byla stanovena feriticko-perlitická struktura.

Z hlediska výroby zkušebních těles byly uvažovány tři sady. První sada byla vyrobena přímo ze základního materiálu (ferit-perlit) a druhá z čistého svarového materiálu (ferit-perlit). Třetí sada zkušebních těles představovala převládající bainitickou strukturu vyskytující se v TOO. Všechny tři sady zkušebních těles (tvar a rozměry dle standardního vzorku pro tahovou zkoušku) byly použity v rámci následujících mechanických zkoušek: zkoušky jednoosým tahem, relaxační zkoušky a creepové zkoušky.

Cílem bylo získat EP a EVP vstupní materiálové charakteristiky pro provedení numerických analýz.

4 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Na obr. 4.1 jsou pro ilustraci uvedeny záznamy relaxačních (vlevo) a creepových (vpravo) zkoušek materiálu P355NL1 (základní materiál - ferit+perlit) provedených v souladu s experimentálním programem dle ÚAM Brno. Kompletní výsledky všech zkoušek jsou uvedeny v originální verzi disertační práce.



Obr. 4.1 Ukázka záznamů z provedených relaxačních (vlevo) a creepových (vpravo) zkoušek

5 NUMERICKÉ ANALÝZY

Cílem této části práce bylo zhodnotit a ověřit možnosti a přínos aplikace EVP výpočtového přístupu v porovnání s přístupem EP. V první fázi byly provedeny testovací numerické analýzy. Cílem bylo získat obecné poznatky o deformačně-napěťovém chování při svařování a TZ (TZ ke snížení zbytkové napjatosti po svařování) a také ověření publikovaných předpokladů. Ty uvádějí, že by se měl vliv EVP modelu materiálu projevit zejména v případě vícevrstvého svařování a TZ v porovnání s případem svařování na jeden průchod, kde by neměl být mezi použitím EP a EVP modelu materiálu téměř žádný rozdíl. Ve druhé fázi byly provedeny verifikační numerické analýzy svařování a TZ v souladu s experimentálním programem uvedeným v kap. 3. Ve třetí fázi byl EVP výpočtový přístup použit v rámci praktické aplikace při vývoji návrhu opravy HSS (bez TZ po svařování) metodou Overlay [48] pro jaderné elektrárny Dukovany a Temelín. Všechny numerické analýzy byly provedeny v programu SYSWELD.

5.1 TESTOVACÍ ANALÝZY

V rámci testovacích analýz byly provedeny a zhodnoceny následující výpočty:

- Vliv jednotlivých modelů materiálu na průběhy zbytkové napjatosti v podmínkách vícevrstvého svařování

- Vliv modelů materiálu na průběhy zbytkové napjatosti v podmínkách svařování na jeden průchod
- Zhodnocení vlivu modelů materiálu na průběh a finální hodnoty zbytkové napjatosti v podmínkách TZ
- Vliv viskoplastických parametrů na zbytkovou napjatost ve smyslu použití parametrů stanovených pouze z výchozí struktury (feriticko-perlitická struktura) ve srovnání s parametry stanovenými ze všech výsledných metalurgických struktur (feriticko-perlitická a bainitická struktura)

5.2 VERIFIKAČNÍ ANALÝZY

Tato kapitola diskutuje výsledky EP a EVP numerických analýz svařování a TZ, které byly provedeny v souladu s experimentálním programem (viz kap. 3). Cílem numerických analýz bylo posoudit vliv a přínos používání EVP výpočtového přístupu ve srovnání s EP výpočtovým přístupem nejen vzhledem k výsledkům získaných z reálného experimentu svařování a TZ, ale také ve vztahu k publikovaným výsledkům ve světě.

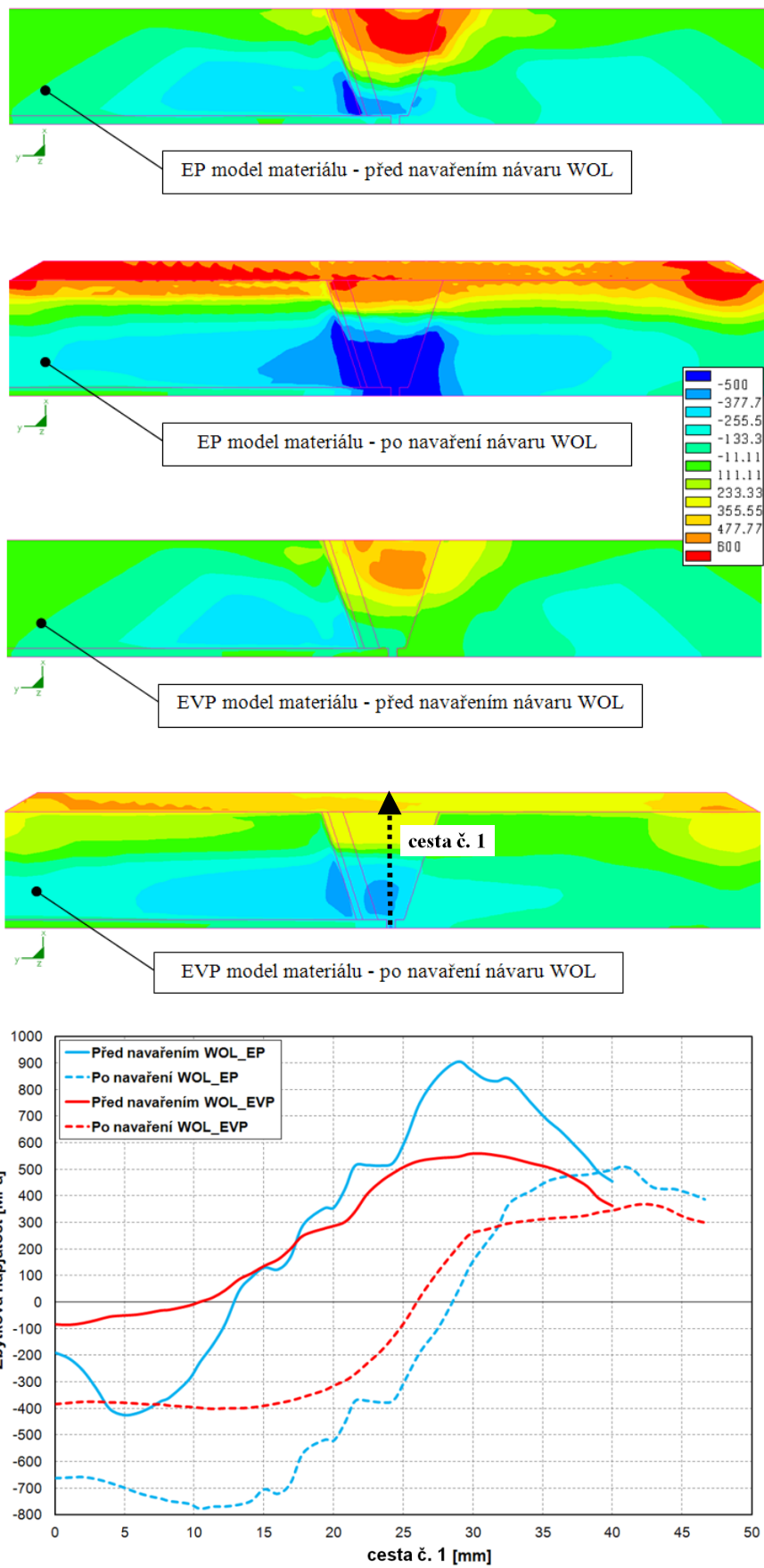
5.3 POUŽITÍ EVP MODELU MATERIÁLU V PRAKTICKÝCH APLIKACÍCH

ÚAM Brno řeší od roku 2011 projekt VaV (ČEZ, a.s.) s názvem "Výzkum rizik heterogenních svarových spojů (HSS) na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav". Jedním z cílů tohoto projektu bylo také navrhnout způsob opravy HSS (bez TZ po svařování) na JEDU a JETE, ve kterých se v průběhu dlouholetého provozu může objevit vada. Jednou z oprav, která bude použita, je tzv. metoda Overlay (WOL) [47] používaná v USA.

Cílem ÚAM Brno ve výše diskutované části projektu VaV je vytvořit obecnou výpočtovou metodiku návrhu rozměrů návaru WOL pro opravu HSS v podmínkách JEDU a JETE na základě zkušeností z USA (EPRI) [47] a vlastních výpočtových zkušeností a přístupů (zahrnutí EVP modelu materiálu do analýz svařování) [48]. V souladu s postupy obecné metodiky potom bude možné provést konkrétní řešení jakéhokoli HSS s uvažováním specifické geometrie, svařovacích parametrů, materiálových vlastností atd.

5.3.1 Příklad výsledků mechanicko-strukturních analýz návrhu WOL

Na obr. 5.3.1.1 je uveden příklad výsledků numerických analýz svařování za předpokladu použití EP nebo EVP modelu materiálu. Níže uvedené výsledky jsou vykresleny při teplotě $T = 20^{\circ}\text{C}$ a dále slouží jako vstup pro hodnocení únavového (cyklického) růstu vady v HSS. Obecně se při hodnocení růstu vady v HSS uvažuje kombinace SCC a únavového růstu vady.



Obr. 5.3.1.1 Zbytková napjatost [MPa] v obvodovém směru

6 SHRNU TÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vliv EP a EVP modelů materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách vícevrstvého svařování

- Použití EVP modelu materiálu v případě analýz vícevrstvého svařování má ve srovnání s EP modely materiálu vliv na finální zbytkovou napjatost. To potvrzuje předpoklad uvedený v [1], že aplikace EVP modelu by měla být přínosná zejména u vícevrstvého svařování.
- Hodnoty zbytkové napjatosti v TOO jsou při použití EVP modelu materiálu kvantitativně nižší než u EP modelu materiálu s izotropním zpevněním, ale kvantitativně vyšší než u EP modelu materiálu s kinematickým zpevněním. To potvrzuje předpoklad uvedený v publikaci [20], který na základě mnoha provedených analýz a experimentálních měření konstatuje, že reálné chování materiálu v podmínkách svařování nelze popsat jak kinematickým, tak ani izotropním modelem materiálu, ale modelem materiálu „někde mezi“ výše uvedenými. Tím může být například EVP model materiálu.
- V publikaci [46] autoři na základě dosavadních výpočtových zkušeností a množství provedených experimentálních měření konstatují, že při aplikaci EP modelu materiálu dochází k nadhodnocování vypočtené zbytkové napjatosti a snaží se jí "uměle" snížit používáním tzv. modifikovaných křivek deformačního zpevnění. Potřeba „umělého“ snižování vypočtené zbytkové napjatosti při použití EP modelu materiálu s izotropním zpevněním pravděpodobně potvrzuje nezbytnost zahrnutí vlivu viskoplastických efektů při simulaci vícevrstvého svařování. To je možné pouze vhodnou aplikací EVP modelu materiálu.

Vliv EP a EVP modelu materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách svařování na jeden průchod

- Hodnoty zbytkové napjatosti při svařování na jeden průchod jsou kvalitativně i kvantitativně téměř srovnatelné pro EP i EVP výpočtový přístup. Zanedbatelný vliv viskoplastických efektů při analýzách svařování na jeden průchod potvrzuje i publikace [1].
- Z pohledu provádění praktických analýz svařování na jeden průchod je tedy dostačující použití EP modelu materiálu, díky čemuž není nutné provádět další experimentální měření potřebné pro určení viskoplastických parametrů.

Vliv EVP modelů materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách TZ

- Konečné hodnoty zbytkové napjatosti získané z analýz TZ jsou v případě obou EVP modelů materiálu (č. 21 i 31) téměř nezávislé na počáteční podmínce analýzy TZ.

Kvantitativní rozdíly jsou řádově v jednotkách MPa. Výše uvedené výsledky byly získány z teplotního cyklu při cca 580°C. V případě teplotních cyklů TZ prováděných při vyšších teplotách (až do 690°C v případě TZ ke snížení zbytkových napětí po svařování) jsou rozdíly téměř nulové viz [22].

- Pokud tedy bude prováděna analýza svařování s následným TZ, mělo by být dostatečné použití EVP modelu materiálu pouze pro analýzu TZ, tzn. v předcházející analýze svařování je postačující použití EP modelu materiálu (s izotropním deformačním zpevněním).
- Pokud bude prováděna pouze analýza svařování (vícevrstvé) bez následného TZ, měl by být použit EVP model materiálu. V případě simulace svařování na jeden průchod je postačující použití EP model materiálu.
- Aplikace obou EVP modelů materiálu vede z kvalitativního pohledu k obdobným výsledkům. Při použití EVP modelu materiálu č. 21 v analýze TZ se získají zejména v oblasti TOO kvantitativně vyšší hodnoty zbytkové napjatosti ve srovnání s EVP modelem materiálu č. 31.

Vliv absence viskoplastických parametrů výsledných metalurgických struktur na zbytkovou napjatost

- Zbytková napjatost zejména v oblasti TOO dosahuje při použití viskoplastických parametrů stanovených pouze z výchozí metalurgické struktury materiálu kvantitativně nižších hodnot ve srovnání s parametry získaných ze všech výsledných metalurgických struktur a to jak v případě numerických analýz svařování, tak i v případě analýz TZ. Kvalitativně nedochází u zbytkové napjatosti k žádným zásadním změnám.
- V ideálním případě by měly být vždy použity viskoplastické parametry stanovené ze všech nebo alespoň dominantních (procentuálně převládající struktura) výsledných metalurgických struktur vyskytujících se ve svarovém spoji pro analýzy svařování i TZ.

Verifikační analýzy

- Ze vzájemného porovnání průběhů vypočtené podélné a příčné zbytkové napjatosti po svařování je evidentní následující trend. Na horní straně desky, která neprošla tolika teplotními cykly jako prostředek a spodní část desky (menší počet napěťově-deformačních cyklů), je rozdíl ve zbytkové napjatosti při použití EP nebo EVP modelu materiálu pouze v řádu jednotek procent. Ovšem se zvyšujícím se počtem teplotních cyklů svařování (přes prostřední část směrem ke spodní části desky) se rozdíly ve zbytkové napjatosti vypočtené za předpokladu EP nebo EVP modelu materiálu zvětšují. Na spodní straně desky jsou již hodnoty zbytkové napjatosti při použití EVP modelu materiálu nižší až o desítky procent (zejména v TOO) ve srovnání s EP modelem materiálu.

Publikace [1] uvádí, že by maximální hodnoty zbytkové napjatosti v podélném směru měly dosahovat přibližně hodnot meze kluzu materiálu nebo lehce nad mezi kluzu. Při použití EVP modelu materiálu se pohybují (vzhledem k hodnotám meze kluzu použitých materiálů) hodnoty podélné zbytkové napjatosti přibližně v tomto intervalu, což je pravděpodobně blíže reálným podmínkám svařování. Ovšem při použití EP modelu materiálu je možné predikovat hodnoty zbytkové napjatosti v TOO až na úrovni dvojnásobku meze kluzu materiálu, což je pravděpodobně vzdálenější reálným podmínkám svařování. U porovnání výsledků analýz TZ je zřejmé, že jak použití EVP modelu materiálu č. 21, tak i č. 31 vede ke snížení a přerozdělení zbytkové napjatosti vlivem relaxace napětí při TZ. Použitím modelu č. 21 se ve srovnání s modelem č. 31 získají kvantitativně vyšší hodnoty zbytkové napjatosti po TZ.

- S ohledem na důvody uvedené v originální verzi disertační práce byla pro získání experimentálních výsledků použita magnetoelastická metoda. Tato metoda je na základě [24] chápána jako metoda polokvantitativní, zejména v případě měření vysokých hodnot zbytkových napětí po svařování. V případě měření zbytkové napjatosti po TZ ji lze považovat za dostatečně věrohodnou. Vzhledem k výše uvedenému lze konstatovat následující. V případě svařování je tedy nutné chápat hodnoty měřené zbytkové napjatosti pouze jako orientační. Ovšem i tak je patrné, že při použití EVP modelu materiálu je vypočtená zbytková napjatost blíže experimentálnímu měření než při použití EP modelu materiálu. Bohužel experimentální měření bylo provedeno na horní straně desky, kde, jak bylo diskutováno, nedochází k takovému rozdílu v hodnotách zbytkové napjatosti pro EP a EVP model materiálu jako na spodní straně desky, kde by byl rozdíl patrnější. V případě tepelného zpracování se výsledky výpočtu při použití jak EVP modelu materiálu č. 21 (stejný model materiálu se stejnými viskoplastickými parametry byl použit i v případě svařování), tak i č. 31 dobře shodují s experimentálním měřením. Samozřejmě je nutné poznamenat, že v rámci nějakého dalšího projektu by bylo dobré provést ještě další sérii experimentálních verifikačních měření nejlépe pomocí neutronové difrakce.
- Jak již bylo uvedeno, verifikací vypočtených výsledků lze chápat také porovnání s trendem výpočtů, které se provádějí ve světě. Publikace [1] uvádí, že EVP model materiálu by měl být přínosný zejména v případě vícevrstvého svařování. Výsledky v této práci se s tímto tvrzením shodují. Publikace [20] uvádí, že se reálné chování materiálu při svařování nachází někde mezi izotropním a kinematickým deformačním zpevněním. Při použití EVP modelu materiálu byly obdrženy výsledky, které se s tímto předpokladem shodují. A nakonec publikace [46] uvádí, že na základě mnoha výpočtů a měření dospěli k závěru, že EP model materiálu s izotropním zpevněním nereálně nadhodnocuje maximální hodnoty zbytkové napjatosti, a proto zavedli používání tzv. modifikovaných křivek zpevnění zajišťující

získání nižší vypočtené zbytkové napjatosti. Aplikace EVP modelu materiálu vede k velice podobnému efektu, ovšem přirozenou cestou zohlednění relaxačních resp. creepových procesů. To znamená, že tendenčně se oba přístupy shodují.

Použití EVP modelu materiálu v praktických aplikacích

- Praktickou aplikací je použití EVP modelu materiálu v rámci výpočtového posouzení opravy HSS na JEDU a JETE metodou WOL (stanovení rozměrů návaru WOL).
- Praktický dopad použití EVP modelu materiálu (v rámci analýz svařování) na výsledné rozměry návaru WOL je následující. Rozhodující pro zhodnocení účinnosti návaru WOL, vzhledem k SCC, jsou hodnoty zbytkové napjatosti v oblasti náchylné na SCC, zejména ve fázi PostWOL+PZ. V případě použití EP modelu materiálu dosahuje zbytková napjatost (axiální složka) záporných hodnot (v tlaku) ve srovnání s použitím EVP modelu materiálu, u kterého je zbytková napjatost již kladná (v tahu). V tomto případě byla ještě pro EP i EVP výpočtový přístup splněna podmínka, že zbytková napjatost v náchylné oblasti na SCC nesmí ve fázi PostWOL+PZ překročit cca 70 MPa. Může ovšem nastat situace, kdy EP výpočtovým přístupem bude vypočtena hodnota zbytkového napětí pod cca 70 MPa, ale EVP výpočtovým přístupem již bude překročena. To znamená, že z pohledu hodnot zbytkové napjatosti je EP výpočtový přístup na straně nebezpečné, jelikož při jeho použití byly limity splněny a není potřeba zvětšovat rozměry návaru WOL. Naproti tomu s použitím EVP výpočtového přístupu limity z pohledu hodnot zbytkové napjatosti ještě splněny nebyly a je potřeba zvětšit rozměry návaru WOL. Tím je EVP výpočtový přístup na straně bezpečné.
- Výše uvedené se týkalo především fáze iniciace vady. Ve fázi růstu vady (kombinace SCC a únavového růstu) je důležité znát průběhy zbytkové napjatosti po tloušťce HSS. Rozhodující pro zhodnocení účinnosti návaru WOL z hlediska růstu vady přes tloušťku HSS jsou průběhy zbytkové napjatosti včetně aplikovaných zatížení po navaření návaru WOL a to zejména v oblasti, kde je obtížné provádět NDT. Touto oblastí je $0,5 \cdot$ původní tloušťky HSS (ve smyslu od ID k OD) v případě návaru typu OWOL a $0,75 \cdot$ původní tloušťky HSS u návaru typu FSWOL. Při použití EP modelu materiálu dosahuje zbytková napjatost větších záporných (tlakových) hodnot ve srovnání s použitím EVP modelu materiálu a to především asi v první polovině tloušťky HSS. Přibližně ve druhé polovině tloušťky je opět při použití EP modelu materiálu dosaženo větší kladné (tahové) zbytkové napjatosti. Lze tedy konstatovat, že asi v první polovině tloušťky HSS (oblast zásadní vzhledem k hodnocení účinnosti WOL) jsou z pohledu lomové mechaniky konzervativnější výsledky obdržené pomocí EVP výpočtového přístupu. Ty jsou blíže nule a po přepočtu na hodnoty faktoru

intenzity napětí mohou snadněji "překmitnout" do kladných hodnot, což je z pohledu růstu vady nežádoucí. Prakticky by to znamenalo informaci, že je zapotřebí zvětšit rozměry návaru WOL. Naopak u EP výpočtového přístupu by mohly hodnoty faktoru intenzity napětí zůstat stále záporné a jevit se jako vyhovující, což by znamenalo, že není nutné měnit rozměry návaru WOL. To je v porovnání s EVP výpočtovým přístupem na straně nebezpečné. Přibližně v druhé polovině tl. HSS (oblast není zásadní pro hodnocení účinnosti WOL) jsou z pohledu lomové mechaniky konzervativnější výsledky EP výpočtového přístupu.

- Celkově z pohledu výpočtového hodnocení účinnosti návaru WOL a i dle skutečností uvedených v [46], představuje použití EVP modelu materiálu krok směrem ke zpřesnění vypočtených výsledků.

7 PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE A DALŠÍ VÝVOJ

Mezi přínosy dosažené v disertační práci patří především následující:

- Na základě experimentálního programu navrženého dle ÚAM Brno byly provedeny a vyhodnoceny creepové a relaxační zkoušky uhlíkových (P355NL1, E 46 6 1 Ni B 42 H5, 22K) a austenitických ocelí (08CH18N10T, EA 400/10T) tak, aby z nich bylo možné získat viskoplastické parametry K , M , N (creep) a σ^y (relaxace). Na ÚAM Brno byl navržen postup měření a konkrétní fyzikální význam parametru σ^y .
- Byla vyvinuta a použita metodika transformace "surových" experimentálních dat na viskoplastické parametry (pro všechny výše uvedené materiály) popisující jednotlivé EVP modely materiálu.
- Byly navrženy a provedeny testovací a verifikační numerické analýzy svařování a tepelného zpracování s použitím EVP modelů materiálu.
- Na základě experimentálního měření a výsledků publikovaných ve světě byl ověřen a doložen přínos použití EVP modelů materiálu, vzhledem k reálným podmínkám svařování a tepelného zpracování.
- Bylo zjištěno, že při simulaci vícevrstvého svařování bez následného tepelného zpracování by měl být vždy použit EVP model materiálu (získání přesnějších výsledků).
- Byl zjištěn zanedbatelný vliv použití EVP modelu materiálu při analýzách svařování na jeden průchod. Dostačující je použití EP modelu materiálu s izotropním zpevněním.

- Bylo zjištěno, že při na sebe navazujících numerických analýzách svařování a tepelného zpracování není nutné v numerické analýze svařování použít EVP model materiálu (konečná zbytková napjatost po TZ je nezávislá na modelu materiálu použitém v analýze svařování).
- Nový EVP výpočtový přístup byl použit poprvé v rámci projektu vývoje opravy HSS (bez následného TZ po svařování) na JEDU a JETE metodou WOL. Výpočet rozměrů návaru WOL, respektive hodnocení jeho účinnosti, bude vždy prováděno s ohledem na výsledky zbytkové napjatosti získané použitím EVP modelu materiálu. Použitím EVP modelu materiálu při hodnocení účinnosti návaru WOL dochází v souladu s [46] ke zpřesnění vypočtených výsledků.
- Na základě výsledků disertační práce bylo rozhodnuto o zahrnutí nového EVP výpočtového přístupu do všech budoucích praktických (komerčních i výzkumných) úkolů ÚAM Brno.

V dalším výzkumu by bylo vhodné provést větší množství experimentální verifikace vypočtených výsledků nejlépe pomocí metody neutronové difrakce (v tomto roce byl v rámci Centra kompetence podán návrh projektu s ÚJV Řež, který se týká výše uvedeného). Dále by bylo vhodné prověřit možnost provádění tahových, creepových a relaxačních zkoušek pomocí tzv. "small punch testů" [52, 53]. To by umožnilo získávání malých zkušebních vzorků zejména přímo z TOO svarového spoje.

8 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo zlepšit výpočtové přístupy predikce zbytkové napjatosti u svarových spojů svařovaných konstrukcí a tím zajistit větší shodu vypočtených výsledků s reálnými podmínkami svařování a tepelného zpracování. Zlepšení výpočtových přístupů spočívá v aplikaci EVP modelů materiálu, které jsou schopné oproti EP modelům materiálu zohlednit viskoplastické procesy probíhající při vysokých teplotách procesu svařování a tepelném zpracování. To vede ke zpřesnění vypočtených výsledků, které vstupují do dalšího posouzení mezních stavů a přímo rozhodují o bezpečnosti a životnosti svařovaných konstrukcí.

K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné provést následující kroky:

- Zmapovat současný stav experimentálního a především výpočtového posuzování zbytkové napjatosti ve světě a potvrdit předpoklad nutnosti a přínosu použití EVP modelu materiálu.

- Navrhnout, sestavit a realizovat experimentální program, který zahrnuje provedení experimentálního měření creepových a relaxačních zkoušek nutných pro stanovení viskoplastických parametrů potřebných pro popis EVP modelů materiálu.
- Vyvinout a použít metodiku transformace "surových" experimentálních dat na viskoplastické parametry popisující jednotlivé EVP modely materiálu.
- Navrhnout a provést testovací numerické analýzy s cílem získat obecné poznatky o deformačně-napěťovém chování při svařování a TZ, ale také k ověření publikovaných předpokladů.
- Navrhnout a provést verifikační numerické analýzy svařování a TZ v souladu s experimentálním programem.

Po provedení výše uvedených prací, které zmapovaly a potvrdily vliv a přínos používání EVP modelů materiálu v rámci numerických analýz svařování a tepelného zpracování, mohl být následně EVP model materiálu použit pro řešení praktického projektu ÚAM Brno. I při řešení tohoto projektu, jehož cílem byl vývoj opravy HSS (bez následného TZ po svařování) na JEDU a JETE metodou WOL, bylo zjištěno a potvrzeno, že použitím EVP modelu materiálu dojde ke zpřesnění vypočtených výsledků. Proto bylo rozhodnuto o zahrnutí nového EVP výpočtového přístupu do všech budoucích praktických (komerčních i výzkumných) úkolů ÚAM Brno.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RADAJ, D.: Welding Residual Stresses and Distortion - Calculation and Measurement, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2003, 397 s., ISBN 3-87155-791-9.
- [2] BERGHEAU, J.-M., VINCENT, Y., LEBLOND, J.-B., JULLIEN, J.-F.: Viscoplastic behaviour of steels during welding, Science and Technology of Welding and Joining, 2004, Vol. 9, No. 4, s. 323 - 330, DOI 10.1179/136217104225021689.
- [3] JUNEK, L.: Výpočet zbytkových napětí při svařování a tepelném zpracování, Disertační práce, Vojenská akademie v Brně, 1997.
- [4] SLOVÁČEK, M.: Numerické simulace svařování výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí, Disertační práce, Univerzita Obrany, 2005.
- [5] SLOVÁČEK, M.: Výpočet úrovně zbytkových napětí dělicí roviny reaktoru VVER 440 MW, Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 3164/01, listopad 2001.
- [6] SLOVÁČEK, M.: Simulace natavení povrchu turbínové lopatky a výpočet zbytkových napětí na rovinných modelech, Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 3204/01, prosinec 2001.
- [7] DIVIŠ, V., SLOVÁČEK, M.: Zavedení heterogenní svarových spojů do systému Dialife – Výpočet zbytkových napětí, Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 3639/04, listopad 2004.
- [8] JARÝ, M.: Stanovení parametrů a použití elasto-viskoplastického modelu materiálu pro svařování desek z aluminidu železa (Fe₃Al), Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 4557/09, listopad 2009.

- [9] SLOVÁČEK, M.: Tepelné zpracování rotorového hřídele, Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 2277/96, 1996.
- [10] DIVIŠ, V., JARÝ, M.: Numerické analýzy svařování a tepelného zpracování skříně plynové turbíny, Prezentace ppt. ÚAM Brno, 2010.
- [11] BARSOUN, Z.: Residual stress prediction and relaxation in welded tubular joint, IIW – welding in the world, 2007.
- [12] BRAND, M., SIEGELE, D.: Numerical simulation of distortion and residual stresses of dual phase steels weldments, IIW – welding in the world, 2007.
- [13] THORBORG, J., HALD, J., HATTEL, J.: Stellite failure on a P91 HP valve - Failure investigation and modelling of residual stresses, IIW – welding in the world, 2006.
- [14] MOCHIZUKI, M., KATSUYAMA, J., HIGUCHI, R., TOYODA, M.: Study of residual stress distribution at start-finish point of circumferential welding studied by 3D-FEM analysis, IIW – welding in the world, 2005.
- [15] KERROUAULT, N., FONTES, A., GAUTHIER, A., PILVIN, P.: Thermo-elastoviscoplastic approach of the thermomechanical conditions for hot cracking, IIW – welding in the world, 1999.
- [16] DONG, P.: Residual stresses and distortion in welded structures - What we know today and beyond, IIW/Iis Doc.XII-X/XIII/XV-RSDP-89-03, Based on keynote lecture presented at the 6th International conference of trends in welding research, April 2002, Georgia, USA.
- [17] LEMAITRE, J., CHABOCHE, J.-L.: Mechanics of solid materials, Cambridge university press, Cambridge, UK, 1994.
- [18] DEPRADEUX, L., JULLIEN, J.-F.: Experimental and numerical simulation of thermomechanical phenomena during a TIG welding process, 2nd International conference - Thermal process modelling and computer simulation, Nancy, 2003.
- [19] ESI GROUP.: Viscoplastic parameters characterization - example of validation, Pdf prezenaion, 2004.
- [20] LOOSE, T., SAKKIETTIBUTRA, J., WOHLFAHRT, H.: New 3D - calculations if residual stresses consistent with measured results of the IIW round robin programme, Mathematical modelling of weld phenomena 9, Graz University of Technology, 2010, s. 369 - 390, ISBN 978-3-85125-127-2.
- [21] PASQUALE, P., PFEIFFER, W., BURGET, W.: Numerical and experimental investigation on residual stresses in multi-run heavy section high strength welded joints, Mathematical modelling of weld phenomena 4, Graz University of Technology, 1998, s. 620 - 630, ISBN 1-86125-060-6.
- [22] JARÝ, M.: Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování ocelí s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu, Pojednání o budoucí disertační práci předkládané ke státní doktorské zkoušce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, listopad 2010.
- [23] WOHLFAHRT, H.: Report on the experimental Round Robin tests on residual stress, Technical University Braunschweig, 2006.
- [24] VLK, M., HOUFEK, L., HLAVOŇ, P., KREJČÍ, P., KOTEK, V., KLEMENT, J.: Experimentální mechanika, Brno, 2003.
- [25] ŠVARŤÍČEK, K.: Využití numerických simulací a neuronových sítí ke zdokonalení odvrtávací

- metody zjišťování zbytkové napjatosti, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, 2007, 122 s.
- [26] PILIPENKO, A.: Computer Simulation of Residual Stress and Distortions of Thick Plates in Multi-electrode Submerged arc Welding - Their mitigation Techniques, Dissertation Thesis, Department of Machine Design and Materials Technology Norwegian University of Science and Technology N-7491 Trondheim, Norway, July 2001, 222 s.
- [27] JANDERA, M.: Reziduální pnutí v uzavřených čtverhranných profilech z korozivzdorné oceli, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2009.
- [28] KOU, S.: Welding metallurgy, University of Wisconsin, 1987.
- [29] VOSS, O., DECKER, I., WOHLFAHRT, H.: Consideration of microstructural transformations in the calculation of residual stresses and distortion of larger weldments, Mathematical modelling of weld phenomena 4, Graz University of Technology, 1998, s. 584 - 596, ISBN 1-86125-060-6.
- [30] ESI GROUP.: SYSWELD 2010, Reference manual, 2010.
- [31] DIVIŠ, V.: Numerické analýzy MKP v oblasti technologie svařování, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, 2007, 93 s.
- [32] JANÍČEK, P.: Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky, hledání souvislostí - učební texty I, Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2007, 682 s., ISBN 978-80-7204-555-6.
- [33] ČADEK, J.: Creep kovových materiálů, Academia, Praha, 1984
- [34] ESI GROUP.: Viscoplastic behaviour of steels during phase transformation, Viscoplastic parameters characterization - example of input data, PPT prezentaion, 2003.
- [35] JARÝ, M.; DIVIŠ, V.; JUNEK, L. Computational modelling of welding and heat treatment process with application of elastic-viscoplastic material model, Welding and Repair Technology for Power Plants (EPRI congress), In 3420 Hillview Avenue, Palo Alto, California 94304, 2012, s. 148-159.
- [36] ESI GROUP.: Heat treatment of the steel part, Viscoplastic model adjustment, technical report, 2000.
- [37] BOCCIARELLI, M., MAIER, G.: Indentation and imprint mapping method for identification of residual stresses, Computational Materials Science 39, 2007, s. 381 - 392.
- [38] STODOLA, M.: Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 4, Vývoj metodiky hodnocení postupné degradace materiálů HTG svarů a zapracování poznatků do NTD ASI, část 5a), Aktuální stav vývoje metodiky určování mechanických vlastností na základě indentační zkoušky, Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 5235/12, červen 2013.
- [39] OCHODEK, V.: Návrh a realizace modelových svarových spojů pro numerickou simulaci, Zpráva VŠB TUO, arch. č. OH120-HS-345-102-2011, listopad 2011.
- [40] Materiálový list oceli P355NL1, Královopolská Steel s.r.o., 2008.
- [41] Materiálový list přídatného materiálu E 46 6 1 Ni B 42 H5, Ø 3.2 x 350 mm, Oerlikon.
- [42] MultiPass Weld Example - 11503 steel, Zpráva ÚAM Brno, 2000.
- [43] MAGULA, V.: Diagram ARA oceli 11503 v podmínkách svařování, technická zpráva - Výskumný ústav zvaračský, 1998.
- [44] ARA diagram přídatného materiálu E 46 6 1 Ni B 42 H5, poskytnut od VŠB TUO ve formátu bmp., 2011.

- [45] ESI GROUP.: Databáze materiálů pro program Sysweld 2012, Verze 14.0.
- [46] KU, F.-H., TANG, S.-S.: Investigative study of 2-D vs. 3-D weld residual stress analyses of the NRC phase II mockup, Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference, Toronto, 2012, PVP2012-78760.
- [47] FREDERICK, G., KING, C., WILLIS, E.: Material Reliability Program: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in Pressurized Water Reactors (PWRs) (MRP-169) Revision 1-A, Final report of EPRI 1021014, October 2010
- [48] JARÝ, M.: Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 3, část d3), Výpočet zbytkových napětí po provedení opravy metodou Overlay na hladkých trubkách, optimalizace provedení navaření (výška, šířka) v závislosti na průměrech potrubí pro dosažení požadovaného tlakového napětí uvnitř trubky. Podklady pro návrh rozměrů Overlay – dokončení výpočtů pro zbývající heterogenní svarové spoje, zpráva ÚAM Brno, arch. č. 5226/13, červen 2013.
- [49] JARÝ, M.: Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 3, část d1), Výpočet zbytkových napětí po provedení opravy metodou Overlay na hladkých trubkách, optimalizace provedení navaření (výška, šířka) v závislosti na průměrech potrubí pro dosažení požadovaného tlakového napětí uvnitř trubky. Podklady pro návrh rozměrů Overlay – realizace pro heterogenní svarové spoje na EDU, zpráva ÚAM Brno, arch. č. 5093/12, prosinec 2012.
- [50] JARÝ, M.: Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 3, část d2), Výpočet zbytkových napětí po provedení opravy metodou Overlay na hladkých trubkách, optimalizace provedení navaření (výška, šířka) v závislosti na průměrech potrubí pro dosažení požadovaného tlakového napětí uvnitř trubky. Podklady pro návrh rozměrů Overlay – realizace pro heterogenní svarové spoje na EDU, zpráva ÚAM Brno, arch. č. 5194/13, březen 2013.
- [51] JURÁŠEK, L.: Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 3, část i1), Vývoj technologie opravy heterogenních svarových spojů, Aplikace postupu hodnocení růstu defektů ve svarových spojích hladkých trubek opravených technologií overlay – aplikace pro svarové spoje EDU, zpráva ÚAM Brno, arch. č. 5204/13, květen 2013.
- [52] DYMÁČEK, P., MILIČKA, K., DOBEŠ, F.: Analysis of potential factors influencing the relation between small punch and conventional creep tests, The first international conference SSTT in Ostrava 2010, Conference proceedings, s. 50 - 53, ISSN 0018-8069.
- [53] HŮLKA, J., KUBÍK, P., PETRUŠKA, J., FORET, R.: FEM sensitivity analysis of small punch test, The second international conference SSTT in Ostrava 2012, Conference proceedings, s. 329 - 328, ISBN 978-80-260-0079-2.

SEZNAM VYBRANÝCH VLASTNÍCH PUBLIKACÍ VZTAHUJÍCÍCH SE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

JARÝ, M. Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 3, část d3), Výpočet zbytkových napětí po provedení opravy metodou Overlay na hladkých trubkách, optimalizace provedení navaření (výška, šířka) v závislosti na průměrech potrubí pro dosažení požadovaného tlakového napětí uvnitř trubky. Podklady pro návrh rozměrů Overlay – dokončení výpočtů pro zbývající heterogenní svarové spoje, zpráva ÚAM Brno, arch. č. 5226/13, červen 2013.

DIVIŠ, V.; JARÝ, M. Technická podpora při vývoji opravy nátrubku TC na JE Temelín - Stanovení zbytkových napětí z výroby, zpráva ÚAM Brno, archivní číslo 5188/13, duben 2013.

JARÝ, M. Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav, Etapa 3, Vývoj technologie opravy heterogenních svarových spojů, část b2), Měření scházejících nestandardních materiálových charakteristik pro výpočet zbytkových napětí po svařování programem SYSWELD, Měření relaxačních a creepových zkoušek, Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 5097/12, listopad 2012.

JARÝ, M.; DIVIŠ, V.; JUNEK, L. Computational modelling of welding and heat treatment process with application of elastic-viscoplastic material model. In *10th International EPRI Conference - Welding and Repair Technology for Power Plants and Components*. California, USA: 2012. s. 148-159.

JARÝ, M.; DIVIŠ, V. The study of the possibilities of residual stresses prediction in weld joint using the elastic- viscoplastic material model. In *Proceedings, 48th International Scientific Conference, Experimentální Analýza Napětí, Velké Losiny*. 1. Olomouc: Palacky University, 2010. s. 145-154. ISBN: 978-80-244-2533-7.

JARÝ, M. Stanovení parametrů a použití elasto-viskoplastického modelu materiálu pro svařování desek z aluminidu železa (Fe_3Al), Zpráva ÚAM Brno, arch. č. ZP 4557/09, listopad 2009.

PROJEKTY ŘEŠENÉ DOKTORANDEM

- F4E - 2008 - GRT - 09 (PNS-TBM) - Starting Seam Assembly Program for Local Model Simulation (2008 - 2009) - spoluřešitel projektu
- 2A-1TP1/101 - Components and technologies for fusion reactors (2006 - 2010) - spoluřešitel projektu
- VaV ČEZ, a.s. - Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav (2011 - 2014) - spoluřešitel projektu

CURRICULUM VITAE

Jméno a příjmení: Milan Jarý

Datum narození: 3. 12. 1983

Národnost: česká

Trvalé bydliště: Bešůvka 1, 64100 Brno

Email: jarymilan@seznam.cz

VZDĚLÁNÍ:

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008 - současnost | probíhající doktorské studium: VUT v Brně; Fakulta strojního inženýrství, obor Inženýrská mechanika téma disertační práce: Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování ocelí s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu |
| 2003 - 2008 | magisterské studium: VUT v Brně; Fakulta strojního inženýrství, obor Inženýrská mechanika téma diplomové práce: Výpočtové modelování mechanických zkoušek kompozitů pryž - ocelové vlákno |
| 1999 – 2003 | Střední průmyslová škola strojnická Chrudim; obor strojírenství |

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI:

| | |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008 - současnost | Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o. – výzkumný pracovník |
| 2006 - 2007 | Blata – návrh a konstrukce nástrojů na výrobu motocyklů |
| 2005 - 2006 | Berit – geodetické práce a vytváření interaktivních map elektrické sítě severní Moravy pro ČEZ |
| 2004 - 2005 | VIP Park – rozvoj a inovace českých firem v oblasti IT technologií |
| 2002 – 2003 | Bramac – spolupráce na vývoji nové výkresové dokumentace celé výrobní linky na střešní krytiny |

ODBORNÉ ZAMĚŘENÍ:

- Výpočtové modelování procesů svařování a tepelného zpracování
- Řešení problémů zbytkové napjatosti a distorzí svařovaných a tepelně zpracovaných konstrukcí
- Analýzy pevnosti a životnosti komponent jaderných elektráren

ABSTRAKT

Práce se zabývá zdokonalením výpočtových přístupů predikce zbytkové napjatosti u svarových spojů svařovaných konstrukcí s cílem zajistit větší shodu vypočtených výsledků s reálnými podmínkami svařování a tepelného zpracování. Zlepšení výpočtových přístupů spočívá v aplikaci elasto-viskoplastických modelů materiálu, které jsou schopné oproti elasto-plastickým modelům materiálu zohlednit viskoplastické procesy probíhající při svařování a tepelném zpracování. To vede ke zpřesnění vypočtených výsledků, které vstupují do dalšího posouzení mezních stavů a přímo rozhodují o bezpečnosti a životnosti svařovaných konstrukcí. Provedené výpočtové a experimentální práce, konfrontované s publikovanými výsledky ve světě, potvrzují vliv a přínos používání elasto-viskoplastických modelů materiálu v rámci numerických analýz svařování a tepelného zpracování. Proto je dále elasto-viskoplastický model materiálu použit při řešení praktického projektu ÚAM Brno. Řešení tohoto projektu, jehož cílem je vývoj opravy heterogenních svarových spojů (bez následného tepelného zpracování po svařování) na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín metodou "Weld overlay", potvrdilo, že použití elasto-viskoplastického modelu materiálu vede ke zpřesnění vypočtených výsledků. Z tohoto důvodu bude elasto-viskoplastický výpočtový přístup zahrnut do všech budoucích praktických úkolů ÚAM Brno.

ABSTRACT

This dissertation thesis deals with the improvement of computational approaches for prediction of residual stresses in welded joints of welded structures in order to ensure greater compliance of the calculated results with the real conditions of welding and heat treatment. The improvement of computational approaches is based on application of elastic-viscoplastic material models which are able (compared with elastic-plastic material models) to take into account the viscoplastic processes ongoing during welding and heat treatment. This leads to more accurate calculated results which enter into further assessment of limit states and directly decide on the safety and lifetime of welded structures. Performed computational and experimental works, confronted with results published in the world, confirm the influence and benefit of application of elastic-viscoplastic material models in the frame of welding and heat treatment numerical analyses. Therefore elastic-viscoplastic material model is further applied in solution of practical project solved by IAM Brno. Solution of this project, whose aim is the development of repair of dissimilar metal welds (without post-weld heat treatment) in Dukovany and Temelin nuclear power plants using "Weld overlay method", has confirmed that application of elastic-viscoplastic material model leads to more accurate calculated results. For this reason the elastic-viscoplastic computational approach will be included into all future tasks of IAM Brno.