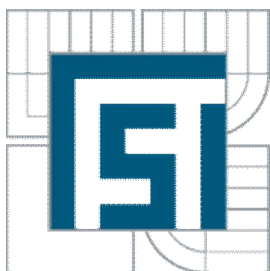


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

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

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. MILAN JARÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUBOMÍR JUNEK, Ph.D.

BRNO 2013

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.

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

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.

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

Bibliografická citace:

JARÝ, M. *Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování ocelí s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 130 s. Vedoucí disertační práce Ing. Lubomír Junek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lubomíra Junka, Ph.D. s využitím vlastních znalostí získaných během studia a na základě použité a důsledně citované odborné literatury.

V Brně dne 25.7.2013

.....

Poděkování

Rád bych nejprve srdečně poděkoval svému školiteli Ing. Lubomíru Junkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a především za podporu, bez které by disertační práce nemohla vzniknout.

Dále bych chtěl také velice poděkovat mým kolegům jmenovitě Ing. Vladimíru Divišovi, Ph.D., Ing. Ladislavu Juráškoví, Ph.D. a Ing. Liboru Vlčkovi, Ph.D. za jejich ochotu a čas strávený při četných diskuzích nad problematikou disertační práce.

Obsah

1 ÚVOD	13
1.1 Význam disertační práce a její předpokládaný přínos	14
1.2 Cíle disertační práce	15
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	16
2.1 Výpočtové modelování	16
2.2 Experimentální měření	20
3 ZBYTKOVÁ NAPJATOST VE SVAŘOVÁNÍ A TZ	23
3.1 Klasifikace zbytkové napjatosti	23
3.2 Příčiny vzniku, vývoj a formování zbytkové napjatosti	25
3.2.1 Příčiny vzniku zbytkové napjatosti	25
3.2.2 Vývoj zbytkové napjatosti v průběhu teplotního cyklu	26
3.2.3 Formování zbytkové napjatosti ve vztahu k tepelnému zdroji	28
3.3 Typy průběhů zbytkové napjatosti	31
3.3.1 Podélná zbytková napjatost	31
3.3.2 Příčná zbytková napjatost	33
4 VÝPOČET ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI VE SVAŘOVÁNÍ A TZ	36
4.1 Nalezení vstupních parametrů diagramu transformačních přeměn	38
4.2 Teplotně-strukturní analýza	38
4.3 Mechanicko-strukturní analýza – EP přístup	39
4.4 Mechanicko-strukturní analýza – EVP přístup	42
4.4.1 Porovnání EP a EVP modelu materiálu	42
4.4.2 Význam použití EVP modelu materiálu	44
4.4.3 Typy EVP modelů materiálu	47
4.5 Materiálové charakteristiky	48
4.5.1 Měření a vyhodnocení mechanických vlastností materiálu pro EVP analýzu	49
4.6 Možnosti experimentálního měření zbytkové napjatosti	51
5 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM	52
5.1 Návrh a realizace modelových svarových spojů	52
5.1.1 Technologický postup svařování a TZ, teplotní cykly, stanovení výsledných metalurgických struktur	52
5.1.2 Měření zbytkové napjatosti po svařování a TZ magnetoelastickou metodou	56
5.2 Provedení mechanických zkoušek materiálů modelového svarového spoje	58
6 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	59
6.1 Termofyzikální vlastnosti materiálu P355NL1 a E 46 6 1 Ni B 42 H5	59

6.2 EP mechanické vlastnosti materiálu P355NL1 a E4651NiB32H5.....	62
6.3 EVP mechanické vlastnosti materiálu P355NL1 a E 46 6 1 Ni B 42 H5.....	66
6.3.1 Výsledky relaxačních zkoušek.....	66
6.3.2 Výsledky creepových zkoušek.....	68
6.3.3 Postup stanovení viskoplastických parametrů	70
6.3.4 Viskoplastické parametry.....	73
7 NUMERICKÉ ANALÝZY	75
7.1 Testovací analýzy	75
7.1.1 Vliv EP a EVP modelů materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách vícetrstvého svařování.....	77
7.1.2 Vliv EP a EVP modelu materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách svařování na jeden průchod	79
7.1.3 Vliv EVP modelů materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách TZ.....	80
7.1.4 Vliv absence viskoplastických parametrů výsledných metalurgických struktur na zbytkovou napjatost	82
7.2 Verifikační analýzy.....	83
7.2.1 Výpočtový model.....	83
7.2.2 Okrajové podmínky	84
7.2.3 Výsledky teplotně-strukturních analýz	85
7.2.4 Výsledky mechanicko-strukturních analýz.....	90
7.2.5 Zhodnocení výsledků mechanicko-strukturních analýz.....	101
7.3 Použití EVP modelu materiálu v praktických aplikacích.....	103
7.3.1 Stručný popis metody WOL a její aplikace v rámci českých JE	103
7.3.2 Výpočtové předpoklady	104
7.3.3 Výsledky mechanicko-strukturních analýz s ohledem na SCC	107
7.3.4 Výsledky mechanicko-strukturních analýz s ohledem na únavu materiálu.....	111
7.3.5 Zhodnocení výsledků mechanicko-strukturních analýz.....	115
8 SHRUTÍ A DISKUZE VÝLEDKŮ.....	117
9 PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE A DALŠÍ VÝVOJ	121
10 ZÁVĚR.....	122
Seznam použité literatury.....	123
Seznam zkratk	127
Seznam symbolů	129

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-napět'ovou 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 a její předpokládaný přínos

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 nepřímě 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.

Předpokládaným přínosem disertační práce by mělo být dle [22] následující:

- Upřesnění požadavků a zdokonalení metodiky experimentálního měření vstupních materiálových dat pro popis visko-plastického chování materiálu (creepové a relaxační zkoušky).
- Vytvoření testovacích a verifikačních výpočtových modelů a jejich použití pro validační numerické analýzy svařování a tepelného zpracování s použitím EVP modelu materiálu. Porovnání vypočtených výsledků s výsledky publikovanými ve světě.
- Použití a ověření možnosti provádění experimentálního měření zbytkových napětí ve svarovém spoji pomocí dostupných metod a přístupů a tím dále ověřit výsledky numerických analýz.
- Ověření možnosti a nutnosti použití EVP modelu materiálu při na sebe navazujících numerických analýzách svařování a tepelného zpracování.
- Použití EVP modelu materiálu (nového výpočtového přístupu) v praktických aplikacích (reálnější popis hodnot zbytkových napětí, zohlednění procesu homogenizace zbytkových napětí v průřezu svarového spoje => hodnocení mezních stavů svařovaných konstrukcí, optimalizace tepelného zpracování atd.).

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 experimentálními měřeními 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.

Dílní 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 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V této kapitole je uveden současný stav a úroveň přístupu k problematice predikce zbytkové napjatosti po svařování a tepelném zpracování a to jak pomocí výpočtového modelování, tak i experimentálního měření v ČR i v zahraničí. Vzhledem k velkému počtu různých publikovaných článků budou dále uvedeny pouze ty nejzajímavější z pohledu autora. Ovšem ve stručnosti je zde nutné uvést alespoň některé odkazy na publikované články a praktické práce provedené na UAM Brno s ohledem na volbu konstitutivních modelů materiálu (EP, EVP) použitých v těchto analýzách. Na základě článků a praktických úloh [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15] lze konstatovat, že z hlediska výpočtového modelování procesu svařování se v největší míře v praktických aplikacích používá EP model materiálu. V některých publikacích je uvedeno i použití určitých typů EVP modelů materiálu ve výpočtovém modelování zejména procesu tepelného zpracování. Ovšem je třeba zdůraznit, že používání EVP modelu materiálu je v současnosti propracováno především v teoretické rovině a v praktických úlohách je výpočet zbytkových napětí pomocí EVP modelu materiálu spíše ve fázi výzkumu a testování.

2.1 Výpočtové modelování

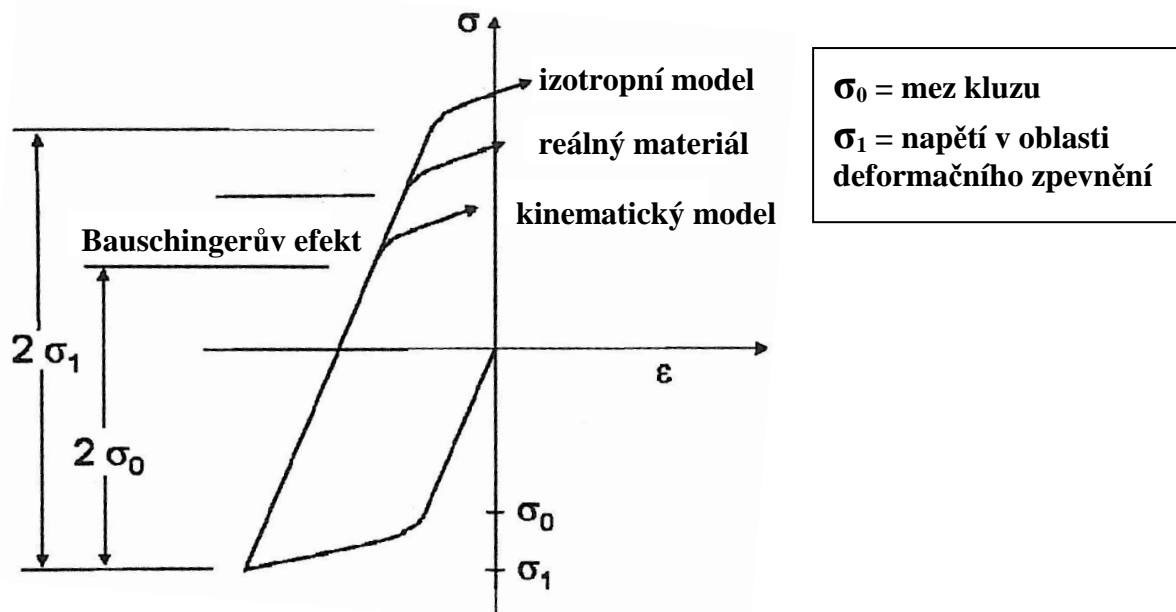
Práce [3] se zabývá výpočtovým modelováním procesu svařování s použitím EP modelu materiálu s izotropním zpevněním v rámci projektu numerické simulace oprav komponent jaderných elektráren bez následného tepelného zpracování. Autor se ve své disertační práci zabývá vývojem nových technologických postupů oprav defektů, které mohou vzniknout v průběhu provozu jaderné elektrárny. Zavádí a verifikuje možnosti použití prostorového pohybujícího se tepelného zdroje do systému SYSWELD, jehož použití má zásadní vliv na výsledné hodnoty zbytkových napětí po svařování. Dále je zde vhodně zohledněn vliv transformačních přeměn materiálu (v praktické úloze, ne jen na teoretické úrovni). Ovšem jak autor sám v práci uvádí, ve výpočtu nebylo možné uvažovat viskoplastický model materiálu, jelikož v té době ještě nebyl v softwaru dostupný. Proto v této práci nebylo možné zhodnotit vliv a dopad viskoplastických efektů na výslednou zbytkovou napjatost.

Práce [4] se zabývá výpočtovým modelováním procesu svařování, konkrétně výpočtem a hodnocením distorzí a zbytkových napětí. Nejprve autor uvádí obecný teoretický přehled EP modelů materiálu. Dle [16] vede použití EP model materiálu s izotropním zpevněním k nadhodnocení zbytkových napětí (velice konzervativní - ovšem ne vždy). Ovšem na druhou stranu aplikace EP modelu materiálu s kinematickým zpevněním vede k podhodnocení zbytkových napětí a výsledky pak mohou být na straně nebezpečné. Lit. [16] obecně doporučuje použití kombinovaného modelu materiálu, ovšem u tohoto modelu je obtížné stanovit koeficient vyjadřující podíl kinematického a izotropního zpevnění ve výpočtu. K reálnějšímu popisu chování materiálu v rámci numerických analýz svařování by podle [17, 18, 19] mělo vést použití EVP model materiálu. V době vzniku této práce byl již v MKP programu SYSWELD k dispozici EVP model materiálu (Leblond model). Jedním z cílů této práce [4] bylo použití EVP modelu materiálu v rámci numerické analýzy

svařování a s tím související nalezení vstupních dat pro tento model materiálu. V disertační práci byl vytvořen projekt na aplikaci EVP modelu materiálu s následujícím obsahem: provedení creepových testů, hledání vstupních dat v literatuře, transformace vstupních dat pro numerické analýzy a numerické analýzy procesu svařování. EVP parametry byly měřeny pro austenitickou ocel 316L. Autor dále uvádí část postupu nalezení parametrů potřebných pro popis EVP modelu materiálu. Konkrétně jde o parametry K, M, N, které se získají z krátkodobých creepových zkoušek. Ovšem k úplnému popisu EVP modelu materiálu je ještě nutné stanovit „viskoplastickou“ mez kluzu materiálu σ_y . Tu lze stanovit pouze na základě relaxačních testů. V DP nejsou uvedeny žádné hodnoty „viskoplastické“ meze kluzu ani žádná zmínka o provedených relaxačních testech. V poslední části práce týkající se zbytkových napětí autor provádí shrnutí a vzájemné porovnání výsledků (pouze pomocí maximálních hodnot redukovaných napětí, což může být značně nevyhovující) získaných s použitím všech výše zmíněných modelů materiálu. Nejvyšší dosažená zbytková napjatost byla získána s použitím EP modelu materiálu s izotropním zpevněním. Rozdíl zbytkových napětí mezi EP m. m. s kinematickým a izotropním zpevněním byl 25 %. Nejnižší vypočtená zbytková napjatost byla získána s použitím EVP modelu materiálu. Rozdíl zbytkových napětí mezi EP m. m. s izotropním zpevněním a EVP m. m. byl ovšem ještě o 8 % větší (celkově 33 %), což nutně vede k následující otázce. Pokud předpokládáme, že použití EP modelu materiálu s kinematickým zpevněním je na straně nebezpečné, izotropní zpevnění je velice konzervativní a EVP model materiálu by měl reflektovat reálnější chování materiálu, pak by hodnota zbytkového napětí získaná EVP analýzou neměla být menší, než hodnota zbytkového napětí z EP analýzy s kinematickým zpevněním. Tento fakt uvedený v autorově tabulce opět vede k otázce, jaká byla použita „viskoplastická“ mez kluzu materiálu, která má spolu s parametry K, M, N zásadní vliv na konečnou zbytkovou napjatost.

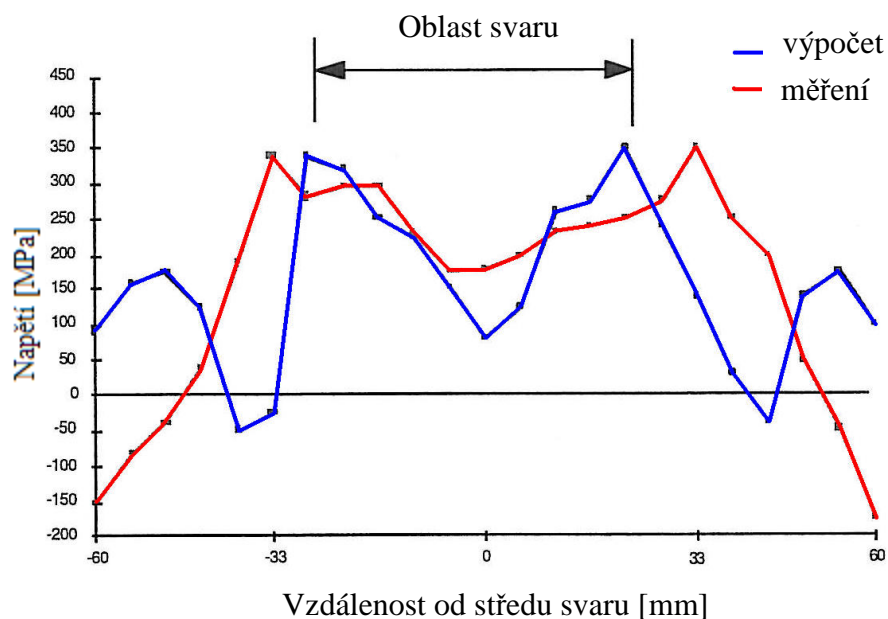
Publikace [20] prezentuje práci provedenou v rámci mezinárodního projektu Round Robin test se zaměřením na predikci zbytkových napětí v desce z austenitické oceli. Konkrétně se článek zabývá numerickými analýzami svařování (SYSWELD) s cílem posoudit vhodnost jednotlivých EP modelů materiálu vzhledem k naměřeným průběhům zbytkových napětí. V numerických analýzách svařování byly použity EP modely materiálu s kinematickým, izotropním a kombinovaným zpevněním. Experimentální měření bylo provedeno na několika pracovištích s použitím neutronové a RTG difrakce a dále pomocí odvrtávací metody. V předešlém odstavci bylo zmíněno, že pro výpočty a experimentální měření byla zvolena deska z austenitického materiálu. U austenitických materiálů má významný vliv Bauschingerův efekt. Na základě tohoto předpokladu se zdálo rozumné zvolit pro první výpočty EP model materiálu s kinematickým zpevněním, který je schopen Bauschingerův efekt zohlednit. Ovšem po srovnání výpočtů (výpočty provedeny na několika nezávislých pracovištích) s experimenty bylo zjištěno, že vypočtené hodnoty zbytkových napětí, zejména špičky napětí v TOO, jsou nižší než hodnoty naměřené. Obecně je nutné zohledňovat vliv Bauschingerova efektu u cyklického plastického přetvoření při pokojových nebo nízkých teplotách, zejména u materiálů s vysokým exponentem deformačního zpevnění (austenitická ocel). Pokud je ale EP model materiálu s kinematickým zpevněním aplikován v případě numerických analýz svařování (oblast vysokých teplot), Bauschingerův efekt přestává být aktivní (materiál se chová téměř ideálně pasticky – bez zpevnění) a dochází

k podhodnocení vypočtené zbytkové napjatosti, zejména pak špiček napětí v TOO svarového spoje. To znamená, že použití EP modelu materiálu s kinematickým zpevněním vede k chybným výsledkům a to zejména u materiálů s vysokým koeficientem zpevnění. Dále byly provedeny numerické analýzy s kombinovaným EP modelem materiálu s 25, 50 a 75% zastoupením kinematického zpevnění. I tento přístup vede podle autorů k podhodnocení nejvyšších tahových špiček zbytkové napjatosti. Proto autoři uvádí, že by měl být pro konzervativní predikci zbytkové napjatosti u austenitických materiálů použit EP model materiálu s izotropním zpevněním. Významným závěrem z článku dle **obr. 2.1.1** je skutečnost, že reálné chování materiálu v podmínkách svařování nelze popsat kinematickým ani izotropním modelem materiálu, ale modelem materiálu „někde mezi“ výše uvedenými. Tím může být například EVP model materiálu.



Obr. 2.1.1 Schematické znázornění deformačně-napět'ové odezvy reálného materiálu

V publikaci [21] se autoři zabývají experimentální a výpočtovou predikcí zbytkových napětí u desky z uhlíkové oceli S450 svařované pod tavidlem. Experimentální měření zbytkové napjatosti bylo provedeno pomocí RTG difrakce. Numerické analýzy byly provedeny v softwaru SYSWELD pravděpodobně za předpokladu EP výpočtu. Model deformačního zpevnění nebyl v článku uveden. Zajímavým výsledkem v tomto článku je porovnání průběhů vypočteného a změřeného zbytkového napětí, které je uvedeno na **obr. 2.1.2**. Zbytková napjatost v oblasti osy svaru je dle výpočtu nižší, než jaká byla stanovena experimentem. Dále podle výpočtu tahová zbytková napjatost začne strmě klesat směrem k nižším hodnotám ihned za oblastí natavení. Ovšem z výsledků měření je patrné, že tahová zbytková napjatost začíná klesat až dále v oblasti TOO. To znamená, že ve skutečnosti by měla být oblast s tahovou zbytkovou napjatostí pravděpodobně o něco širší, než jak to znázorňuje EP výpočet. Výsledné porovnání v článku je zajímavé vzhledem k výsledkům obdržných v této práci, protože při aplikaci EVP modelu materiálu byly získány podobné průběhy zbytkové napjatosti (viz kap. 7.2.4) jako v případě experimentálních průběhů na **obr. 2.1.2**.



Obr. 2.1.2 Porovnání vypočtené a změřené příčné zbytkové napjatosti

V publikaci [2] se autoři zabývají aplikací a vzájemným porovnáním EP a EVP modelů materiálu v rámci numerických analýz svařování. Současně autoři tohoto článku jsou také autory EVP modelů materiálu, které jsou dostupné v programu SYSWELD. Standardně používaným modelem materiálu v numerických analýzách svařování je elasto-plastický model materiálu. Důvodem, proč nejsou viskoplastické efekty (creep, relaxace) uvažovány ve většině prováděných analýz svařování, je velmi krátký čas procesu svařování, v průběhu kterého by se neměly projevit a tím by neměly mít dopad na predikci zbytkové napjatosti. Cílem práce je experimentální a výpočtové zhodnocení vlivu těchto zjednodušení na zbytkovou napjatost a distorze. Experimentální mock-up byl vyroben jako kruhový disk z materiálu 16MND5 (nizkolegovaná uhlíkovo-manganová ocel). Jelikož cílem autorů nebylo simulovat konkrétní svařovací proces, ale zhodnotit vliv viskoplastických efektů všeobecně v průběhu svařování v TOO svarového spoje, vytvořili jednoduchý model, který kontrolovaně teplotně zatěžovali ohřevem (v určité oblasti disku) pomocí laseru. V rámci experimentu bylo prováděno také měření zbytkové napjatosti pomocí RTG difrakce. Výpočtová část představovala vyřešení EP a EVP úlohy. Oba výpočty (s uvažováním a bez uvažování viskózních efektů) předpokládaly izotropní model zpevnění. Protože hlavním cílem této práce je ukázat, že viskoplastické analýzy poskytují lepší výsledky než plastické (v porovnání s experimentem), je zapotřebí nastínit problematiku vstupních parametrů pro mechanicko-strukturní výpočet. V EP analýze jsou používány meze kluzu a křivky deformačního zpevnění v závislosti na teplotě a jednotlivých metalurgických strukturách. Ty jsou získány z měření, která jsou provedena při nízkých rychlostech přetvoření zhruba korespondující s rychlostmi přetvoření při chladnutí. Pokud jsou ale takto změřené parametry použity i pro fázi ohřevu, dochází k rozdílné (nekorretní) deformačně-napěťové odezvě, než jaká by měla správně být. Důvodem je vyšší rychlost přetvoření při fázi ohřevu, která ve skutečnosti vede ke zvýšení hodnot meze kluzu. To znamená, že v EP analýze není možné zohlednit proměnlivost

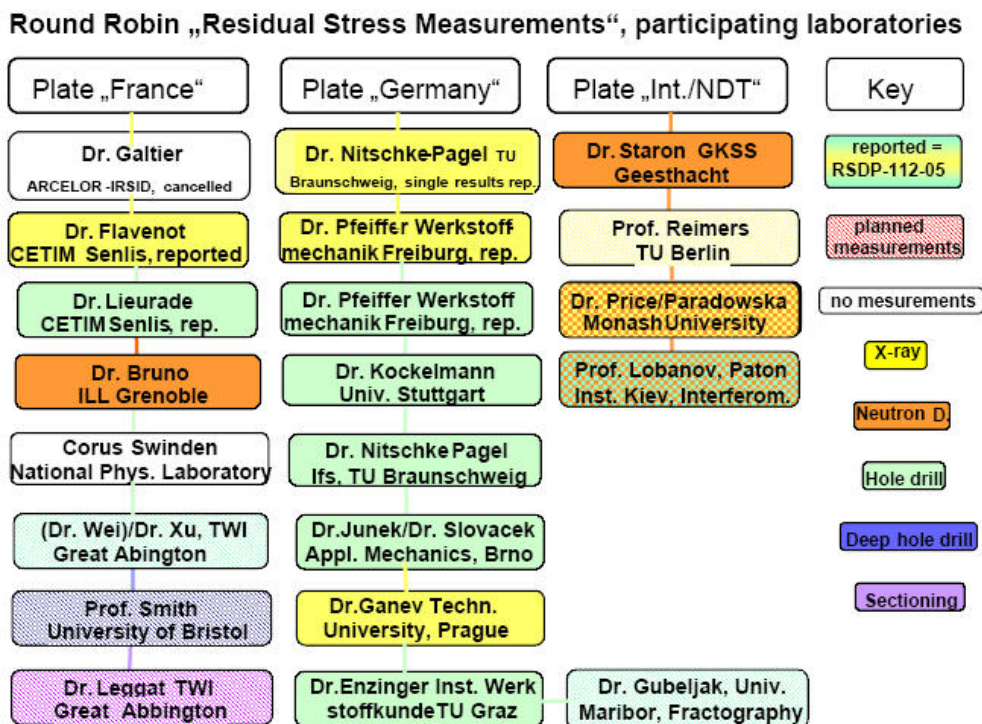
rychlosti přetvoření ve fázi ohřevu a chladnutí. Toto je možné pouze v rámci EVP analýz. To je základní důvod, proč by měla EVP analýza vést k lepším výsledkům. Z konkrétního porovnání EP a EVP analýz s experimentálním měřením, lze konstatovat následující. V oblasti osy svaru jsou hodnoty zbytkové napjatosti získané z EP analýzy nižší ve srovnání s hodnotami z EVP analýzy (vyšší hodnoty), které jsou blíže experimentu. V oblasti TOO jsou na jedné straně disku hodnoty zbytkové napjatosti z EVP analýzy vyšší nebo stejné jako z EP analýzy, avšak na straně druhé jsou hodnoty z EVP analýzy nižší (blíže experimentu) než z EP analýzy. To znamená, že se nedá obecně říci, že EVP model materiálu musí nutně vést v každém místě výpočtového modelu k poklesu zbytkového napětí. Autoři v závěru konstatují, že použití EVP modelu materiálu vede z hlediska predikce zbytkových napětí po svařování k o něco lepším výsledkům v porovnání s EP modelem materiálu. S tím také koresponduje zjištění, že vliv rychlosti přetvoření, který je zohledněn EVP modelem materiálu není pro použitý materiál tolik významný. Ovšem pro jiný typ materiálu by tento vliv mohl být významnější. Aplikace EVP modelu materiálu by měla významnější dopad na predikovanou zbytkovou napjatost ve srovnání s EP přístupem. Obecně lze na základě výsledků konstatovat, že hodnoty a umístění tahových maxim napětí v TOO přibližně korespondují v obou výpočtových přístupech. Podle autorů by měly mít viskózní efekty při vysokých teplotách větší vliv na zbytkové distorze než na zbytkovou napjatost.

Publikace [46] se zabývá výpočtovou a experimentální predikcí zbytkové napjatosti v rámci simulace opravy heterogenních svarových spojů technologií Weld Overlay. Ta se provádí v rámci zmírnění nebo zastavení růstu defektů vlivem korozního praskání pod napětím. Zajímavostí v tomto článku je skutečnost, že doposud autoři používali EP modely materiálu (především s izotropním zpevněním) s tím, že výsledná zbytková napjatost vždy dosahovala v posuzovaných místech výrazně vyšších hodnot napjatosti v porovnání s experimentem. Proto v publikaci uvádějí, že navrhli tzv. modifikované křivky deformačního zpevnění, které vedou k získání nižší zbytkové napjatosti. Modifikace spočívá v tom, že od určitého celkového přetvoření již nedochází k nárůstu napětí. Bod na křivce deformačního zpevnění, odkud je napětí považováno za konstantní, se rovná průměrné hodnotě součtu meze kluzu a pevnosti. Důležitým závěrem je skutečnost, že 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.

2.2 Experimentální měření

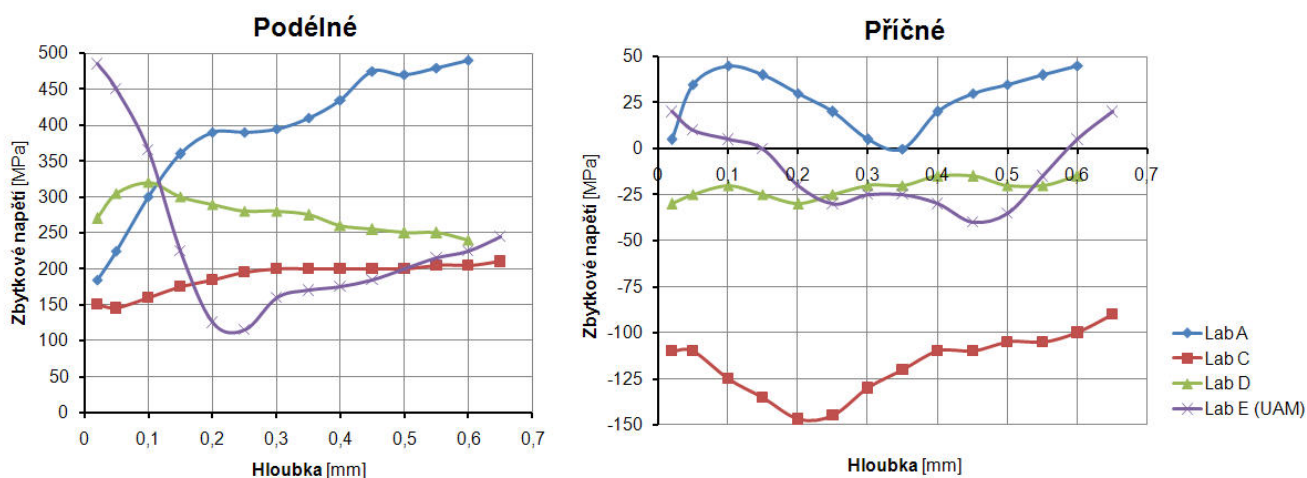
Jako reprezentativní příklad [22] současných možností experimentálního měření zbytkových napětí ve svařování je zde uveden projekt mezinárodní asociace IIW s názvem Round robin test (RRT) on residual stresses [23]. Mezinárodní asociace IIW nechala svařit tři desky, na kterých bylo provedeno měření zbytkového napětí metodou odvrátání, rentgenovou difrakcí a neutronovou difrakcí.

Projektu se zúčastnilo několik výzkumných pracovišť ze zahraničí a ČR a jejich výsledky byly vzájemně porovnány. Přehled o účasti na tomto projektu reprezentuje **obr. 2.2.1**.

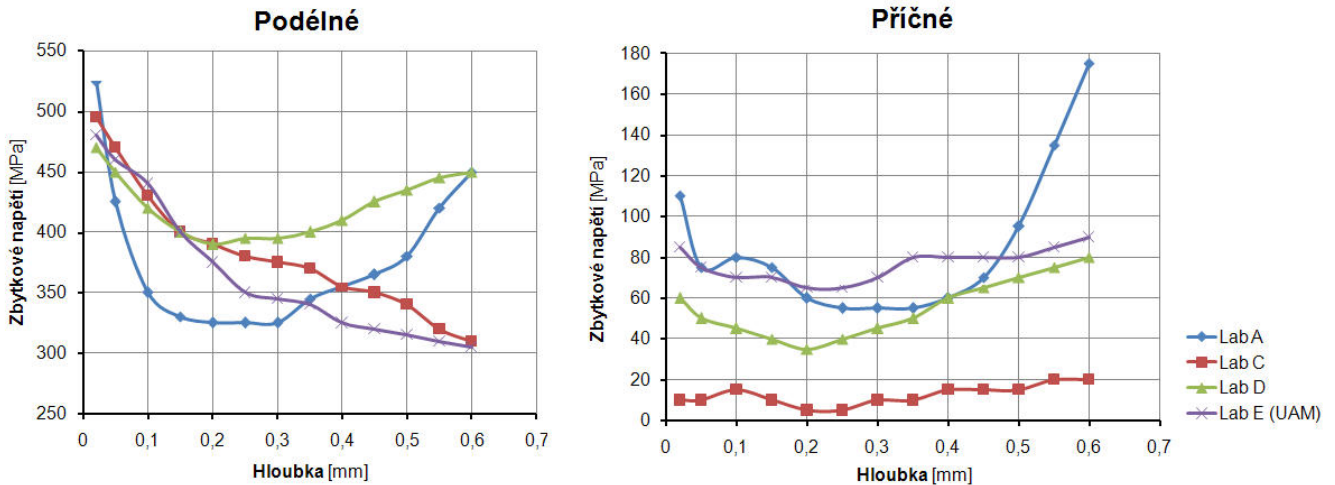


Obr. 2.2.1 Účastníci projektu RRT

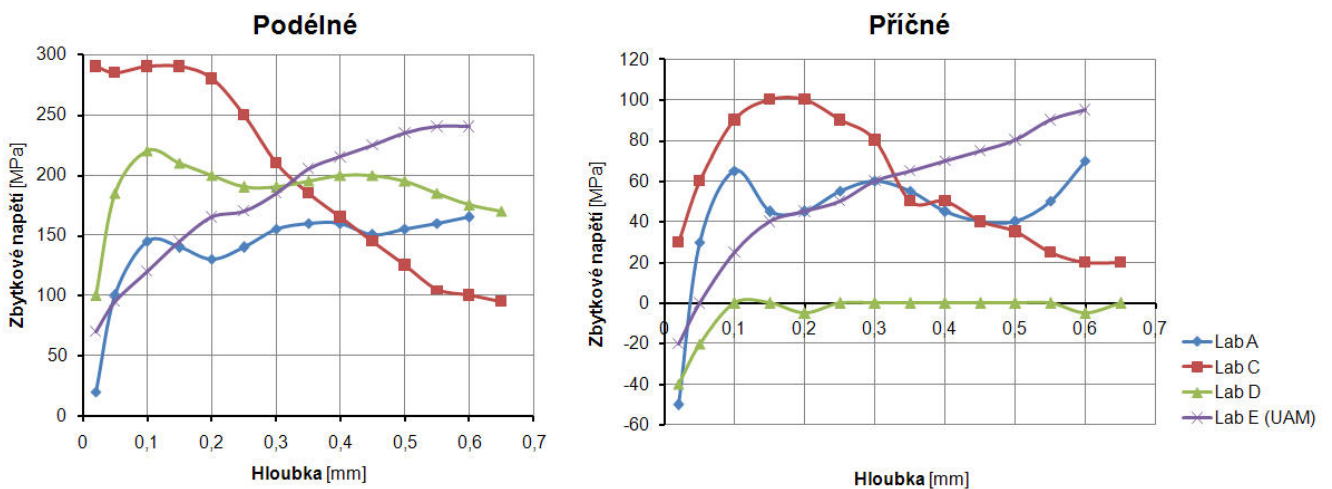
Obr. 2.2.2 až 2.2.4 představuje porovnání měření zbytkových napětí odvrtávací metodou a výsledky jednotlivých pracovišť (porovnání mezi pracovišti A, C, D, E). Pracoviště označené písmenem E představuje ÚAM Brno. Do této práce byly záměrně vybrány výsledky získané odvrtávací metodou, jelikož ostatní výsledky obdržené rentgenovou a neutronovou difrakcí nebyly dostupné v dostatečně přehledné formě pro provedení vzájemného srovnání.



Obr. 2.2.2 Průběh podélného a příčného zbytkového napětí ve svaru



Obr. 2.2.3 Průběh podélného a příčného zbytkového napětí ve vzdálenosti 8 mm od svaru



Obr. 2.2.4 Průběh podélného a příčného zbytkového napětí ve vzdálenosti 20 mm od svaru

Čtyři různá pracoviště, včetně ÚAM Brno, postupně provedla měření zbytkových napětí odvrťovací metodou na jedné desce vyrobené z austenitické oceli 316 L a to ve třech místech: ve svaru, 8 mm od svaru a 20 mm od svaru. Na uvedené výsledky je třeba pohlížet s ohledem na tehdejší možnosti provedení experimentálního měření a to z následujících důvodů. Průběhy zbytkových napětí byly pravděpodobně získány standardním provedením odvrťovací metodou (není vyloučeno použití vylepšené metody). Odvrťovací metoda je věrohodně použitelná pouze v určité oblasti, kde jsou splněny jisté podmínky. Těmito podmínkami jsou například homogenní rovinná napjatost na povrchu, homogenní i nehomogenní napjatost po tloušťce, hodnoty zbytkových napětí nepřekračující požadovaný násobek meze kluzu, experimentální měření jsou prováděná v oblasti lineárně elastických přetvoření. Uvedené podmínky ovšem nelze splnit v případě měření zbytkových napětí v oblasti svarového spoje. Proto se domnívám, že i přes nesporný přínos mezinárodního programu RRT je důležité považovat výsledné průběhy a hodnoty zbytkových napětí za informativní (ve většině případů zde není kvantitativní ani kvalitativní shoda - může být zapříčiněno malým počtem účastníků) a ne zcela odpovídající skutečnému stavu zbytkové napjatosti. Na druhou stranu je ovšem nutné poznamenat, že i v dnešní době je zjišťování zbytkových napětí ve svarovém spoji problematické.

3 ZBYTKOVÁ NAPJATOST VE SVAŘOVÁNÍ A TZ

3.1 Klasifikace zbytkové napjatosti

Dle [24] a [25] jsou obecně zbytková napětí taková napětí, která působí v tělese trvale bez vnějšího zatěžování jako důsledek předchozích technologických procesů. Vznik zbytkové napjatosti v tělese může být způsoben silovým, deformačním nebo teplotním zatížením. Pokud výše uvedená vnější zatížení způsobí vznik pouze elastických přetvoření, dojde po jejich odstranění k úplnému vymizení deformace a nedochází ke vzniku zbytkové napjatosti. Jestliže však dojde vlivem působení vnějších zatížení ke vzniku pružně-plastického stavu (buď v celém tělese nebo pouze v některých jeho oblastech), potom po odstranění vnějšího zatížení zůstávají v tělese jistá zbytková (residuální) napětí. Výslednice vnitřních sil je pak rovna nule.

Zbytková napětí je možno klasifikovat podle různých hledisek. Významným hlediskem třídění zbytkových napětí působících v polykrystalických materiálech je velikost objemů, ve kterých se napětí nemění z hlediska velikosti a směru:

- 1) Zbytková napětí I. druhu (makroskopická) – jsou přibližně homogenní v makroskopické oblasti (v mnoha zrnech) materiálu řádově v mm
- 2) Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická) – jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých zrn
- 3) Zbytková napětí III. druhu (submikroskopická) – jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi

Zbytkové napětí v určitém bodě tělesa je vždy superpozicí všech tří uvedených druhů. Důležitý fakt, který je potřeba brát v potaz je to, že zbytková napětí I. druhu jsou střední hodnotou zbytkových napětí působících v mnoha zrnech. Rozhodujícím rozměrem pro výše zmíněnou klasifikaci zbytkových napětí je tedy velikost zrna materiálu.

Výše zmíněná klasifikace zbytkových napětí byla uvedena jako obecné rozdělení zbytkových napětí, která mohou vzniknout určitým technologickým procesem nebo zatěžováním. Ovšem konkrétní klasifikace zbytkových napětí pouze ve vztahu k procesu svařování a tepelného zpracování je dle [1] a [26] následující:

- 1) Doba životnosti zbytkové napjatosti
- 2) Směrovost zbytkové napjatosti
- 3) Původ vzniku zbytkové napjatosti

V souladu s první bodem klasifikace je zapotřebí rozlišovat mezi pojmy "dočasná zbytková napjatost" vznikající v průběhu svařování a "stálá zbytková napjatost" vzniklá po dosažení úplného vyrovnaní teplot po ochlazení. Dočasná zbytková napjatost (lze také chápat

jako aktuální napjatost v průběhu svařování) je určujícím faktorem pro svařitelnost a stálá zbytková napjatost je rozhodující z hlediska pevnosti svařované komponenty.

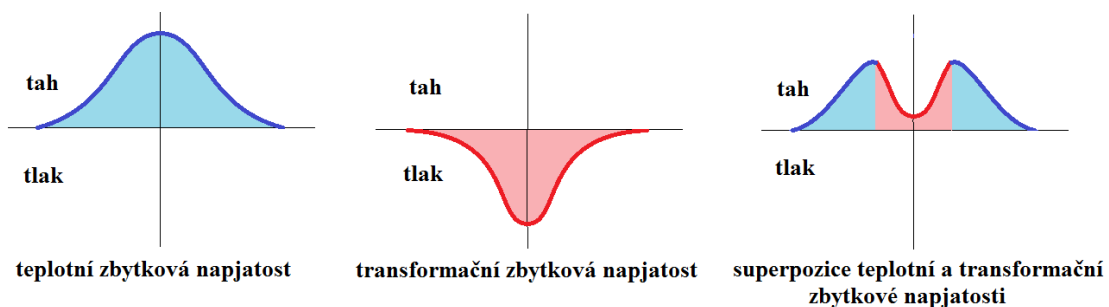
Druhý bod reprezentuje rozdělení zbytkové napjatosti podle směru, ve kterém působí. Rozlišujeme tedy podélnou (longitudinální) zbytkovou napjatost σ_L vznikající ve směru svařování a příčnou (transversální) zbytkovou napjatost σ_T , která vzniká ve směru kolmém na směr svařování.

Dle třetího bodu klasifikace zbytková napjatost vzniká:

- Změnou objemu (volumetrická) - působením teplotní roztažnosti, fázové transformace, chemické přeměny nebo změnou stavu materiálu
- Změnou tvaru (deviátorová) - působením časově nezávislých (plastických) nebo časově závislých (viskoplastických) deformačních procesů v materiálu

Výše uvedené objemové a tvarové změny samozřejmě neprobíhají odděleně, ale vždy spolu souvisí. Ve svařování je jediným zatížením vnesené nerovnoměrně rozložené teplo, které nejprve způsobí ohřev a tím expanzi materiálu a následně ochlazení doprovázené smršťováním materiálu. Expanze a smršťování přímo souvisí s teplotní roztažností materiálu, která podle výše uvedeného zapříčiní nejprve vznik tzv. „teplotní napjatosti“ nebo „teplotní zbytkové napjatosti“. Teplotní napjatost generovaná pouze v oblasti elastických přetvoření vymizí po změně teploty (ochlazení na pokojovou teplotu), která teplotní napjatost způsobila. Z tohoto důvodu většina autorů tuto napjatost neklasifikuje jako zbytkovou. Pokud ovšem dojde k významnému zvýšení teploty nebo rozdílu teploty (nehomogenní teplotní pole), vysoká hodnota teplotní napjatosti vede ke vzniku plastických přetvoření. Tato plastická přetvoření způsobí, že po snížení teploty na pokojovou zůstane přítomna zbytková napjatost vyvolaná teplotní roztažností. Jestliže se ještě jedná o materiál, který vykazuje polymorfní chování (přítomnost fázových transformací), vzniká tzv. „transformační zbytková napjatost“, respektive zbytková napjatost, způsobená transformační plasticitou.

Obecně lze zbytkovou napjatost způsobenou svařováním definovat jako napjatost teplotní (primárně způsobená ve fázi chladnutí materiálu), na kterou se může superponovat zbytková napjatost způsobená fázovými transformacemi materiálu. V oblasti, kde po ochlazení převládají teplotní přetvoření, se vyskytuje tahová zbytková napjatost a v oblasti převládajících transformačních přetvoření vzniká napjatost tlaková. Výše uvedené je dokumentováno na **obr. 3.1.1**.



Obr. 3.1.1 Průběhy teplotní a transformační zbytkové napjatosti

3.2 Příčiny vzniku, vývoj a formování zbytkové napjatosti

V této kapitole je pomocí několika příkladů čerpaných z literatury [1, 26, 27, 28] vysvětlena problematika vzniku, vývoje a formování zbytkové napjatosti s ohledem na proces svařování. První případ znázorňuje vznik zbytkové napjatosti na soustavě tří elementů ve tvaru kvádra (viz podkapitola 3.2.1) simulujících svařování tupého svarového spoje. Druhý případ uvedený v podkapitole 3.2.2 reprezentuje vývoj zbytkové napjatosti v oblasti definovaného objemu fiktivní svařované desky v průběhu jednoho teplotního cyklu. Poslední případ (viz podkapitola 3.2.3) vysvětluje problematiku formování zbytkové napjatosti v jednotlivých místech svařované fiktivní desky s ohledem na pozici tepelného zdroje spolu s detailem deformačně-napěťové odezvy v blízkosti pohybujícího se tepelného zdroje.

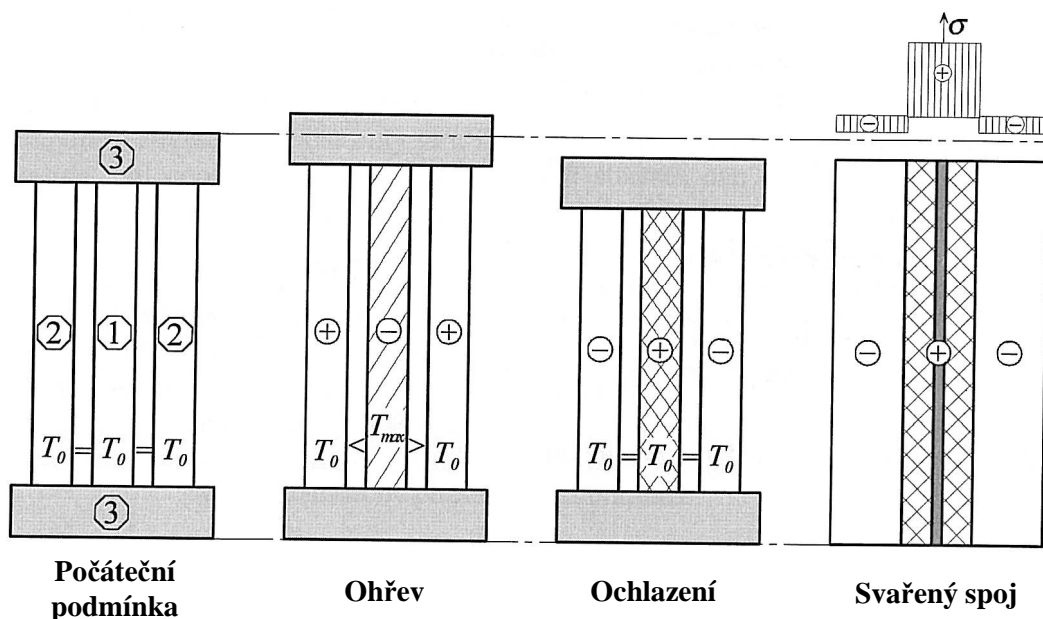
3.2.1 Příčiny vzniku zbytkové napjatosti

Svařovací proces způsobuje vysoce nerovnoměrné zahřívání spojovaných těles. Oblasti blízko svařovacího oblouku jsou nejprve zahřívány až na teploty několika tisíc stupňů Celsia a pak ochlazený zejména vlivem odvodu tepla do objemu tělesa. Lokální zahřívání a následné ochlazování vede ke vzniku objemových změn produkujících dočasná a zbytková napětí.

Pokud je těleso složené z mnoha malých stejně velkých kubických elementů, proces zahřívání těchto elementů povede k jejich rovnoměrnému rozpínání ve všech prostorových směrech. Dokonce budou mít tyto elementy stejnou velikost. Je možné spojit tyto elementy v jedno pevné těleso s tím, že v něm nedojde ke vzniku napjatosti. Ale pokud dochází k nerovnoměrnému zahřívání, pak se každý element pokouší rozpínat úměrně vzhledem k nárůstu teploty v tomto elementu. V této situaci mají jednotlivé elementy rozdílné velikosti, a proto je není možné spojit v jedno pevné těleso jako v předchozím případě. V stejném čase je těleso spojitě a každý element omezuje volné rozpínání sousedního elementu. Tím dochází ke změně délek a úhlů vlivem rozdílné interakce sousedních elementů. Jinak řečeno, dochází ke vzniku složitého deformačně-napěťového stavu na úrovni elementu i celého tělesa.

Pokud byly všechny elementy v průběhu zahřívání v elastickém stavu, pak se po ochlazení celé těleso vrátí do stavu bez jakéhokoli napětí. Pokud se ale elementy v průběhu zahřívání deformují plasticky, vede to následně ke změně jejich rozměrů úměrně množství působícího plastického přetvoření. Výsledkem je dosažení rozdílných velikostí všech elementů, které tím pádem nemohou být znovu seskupeny v jedno pevné těleso bez změny jejich deformačně-napěťového stavu. Tím dochází v tělese ke vzniku zbytkových napětí. Obecně nerovnoměrnost teplotního pole v průběhu svařování skutečných komponent způsobuje složitou trojosou napjatost. To znamená, že se kubické elementy rozpínají ve všech třech směrech rozdílně.

Pro snazší pochopení problematiky vzniku zbytkových napětí ve svařování je použit jednoduchý model tvořený třemi elementy ve tvaru kvádrů uvedený na **obr. 3.2.1.1** [26], který reprezentuje svařování tupého svarového spoje.

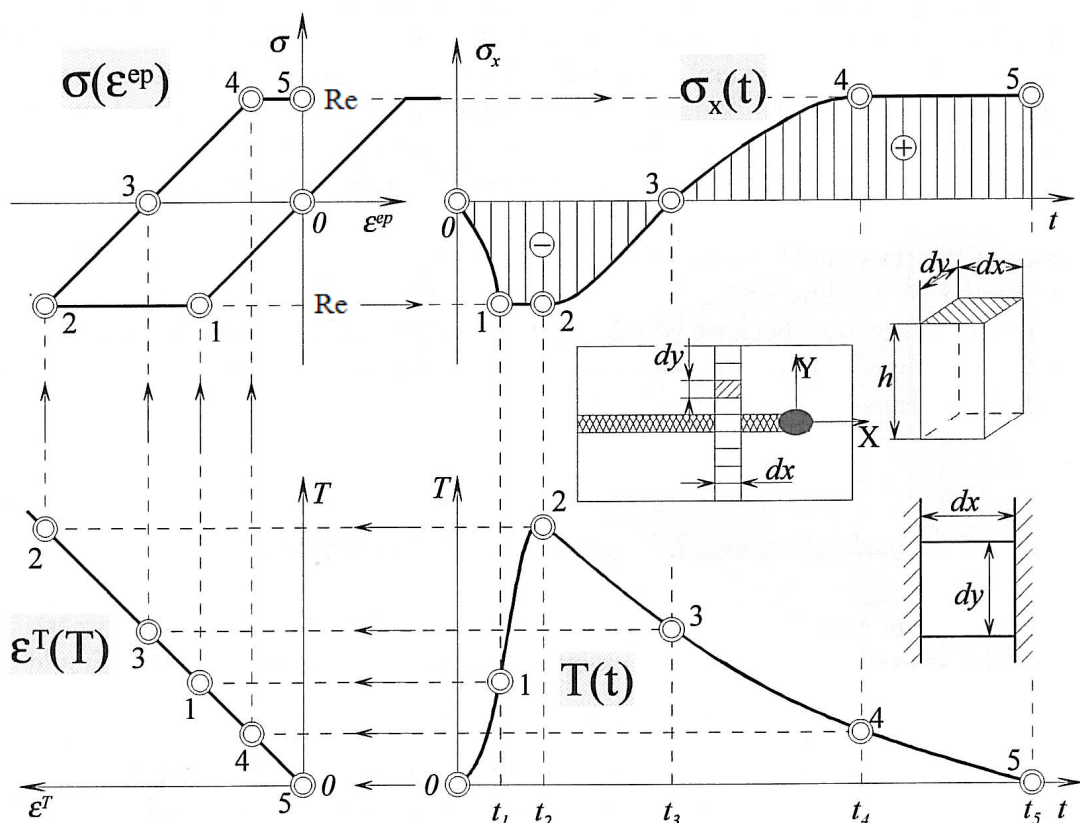


Obr. 3.2.1.1 Schematické znázornění simulace svařování tupého svarového spoje pomocí tří elementů ve tvaru kvádrů

Model se skládá z jednoho elementu č. 1 a dvou elementů č. 2. Elementy č. 1 a 2 jsou navzájem vázány přes tuhý základ č. 3. V jakémkoli čase mají elementy stejnou délku. Centrální element je vystaven působení vysokých teplot, což simuluje oblast v blízkosti svaru. Krajní elementy, které reprezentují spojované desky, jsou drženy na konstantní teplotě. Zahřívání centrálního elementu na teplotu T_{max} způsobí jeho prodloužení o hodnotu $\Delta l = \alpha \cdot \Delta T_{max} \cdot l$ (kde l je počáteční délka elementu). V důsledku působení krajních elementů, které brání expanzi centrálního elementu, dojde v centrálním elementu ke vzniku tlakových napětí. Jestliže je centrální element stlačován plasticky, pak v něm vzniknou nevratná tlaková plastická přetvoření. V průběhu fáze ochlazování se snaží centrální element smršťovat, zatímco krajní elementy mají snahu udržet si původní délku. Proto v centrálním elementu (oblast v těsné blízkosti svaru) vzniká tahová zbytková napjatost, zatímco v krajních elementech (svařované desky) zbytková napjatost tlaková.

3.2.2 Vývoj zbytkové napjatosti v průběhu teplotního cyklu

Vývoj napjatosti v průběhu svařovacího procesu představuje velice složitou interakci mnoha proměnných. Ovšem základní fyzikální podstatu (teplotní, deformační a napěťovou odezvu) je možné do jisté míry vysvětlit i na zjednodušených případech. A právě takové zjednodušené vysvětlení znázorňuje **obr. 3.2.2.1** [26]. Na něm je podrobně popsán vývoj napětí (ve směru svařování – podélné) v bodě zvoleného hranolu, který reprezentuje objemový element svařované desky.



Obr. 3.2.2.1 Kinetika vývoje zbytkové napjatosti v objemovém elementu

Uvažujme případ tenké svařované desky, kde se teplotní gradienty přes tloušťku předpokládají zanedbatelné. Zvolený objemových element je vystaven působení typického teplotního cyklu (spodní pravý okraj obr. 3.2.2.1). Teplota uvnitř hranolu může být považována za konstantní, protože jeho objem je velice malý.

Svařované komponenty mají obvykle ve směru svařování dostatečnou tuhost, což způsobí, že je celkové přetvoření v tomto směru (v našem případě v ose x) významně menší, než ničím neomezené teplotní přetvoření. Tento stav se projevuje u elementů v blízkosti svaru. Proto je přirozené předpokládat, že hranol nemění svoje rozměry ve směru osy x . Ve stejný okamžik dochází v průběhu ohřevu a ochlazení v daných elementech k vývoji podélného napětí σ_x .

Pro zjednodušení uvažujme z hlediska napětí a přetvoření zatěžování a odezvu pouze v jedné ose. To znamená, že napětí σ_y bude rovno nule (ve směru osy y může být element volně deformován). Z výše uvedeného vyplývá, že v podélném směru je $\sigma_x \neq 0$, $\epsilon_x = 0$ a v příčném směru je $\sigma_y = 0$, $\epsilon_y \neq 0$.

Aby bylo možné provést analýzu napěťového cyklu ve zvoleném elementu, je zapotřebí mít informace jednak o objemových změnách materiálu v důsledku zvýšených teplot (dilatometrická křivka) a dále křivky deformačního chování materiálu (deformačně-napěťová křivka). Pokud nejsou v analýze uvažovány strukturální změny v důsledku

fázových transformací, pak může být dilatační křivka aproximována jednou přímou křivkou (součinitel teplotní roztažnosti je konstantní).

Na horním levém okraji **obr. 3.2.2.1** je naznačena idealizovaná deformačně-napěťová křivka, kde je vyznačen průběh napětí jako funkce elasto-plastického přetvoření σ (ε^{ep}). Dilatometrická křivka, kde je znázorněn průběh teplotního přetvoření jako funkce teploty ε^{T} (T), je umístěna pod diagramem napětí a přetvoření σ (ε^{ep}). Vpravo od dilatometrické křivky ε^{T} (T) je situován teplotní cyklus T(t). Na základě vzájemné interakce uvedených diagramů je v pravém horním rohu **obr. 3.2.2.1** vykreslen napěťový cyklus $\sigma_x(t)$, který reprezentuje průběh napětí v čase.

Např. v čase t_1 je teplota T_1 charakterizována bodem 1 na křivce teplotního cyklu. Horizontální čára vedená z tohoto bodu určuje bod 1 na dilatační křivce. Ten představuje velikost teplotního přetvoření, respektive teplotní roztažnosti, při teplotě T_1 . Přejdem vzhůru na σ (ε^{ep}) diagram se získá další bod č. 1. Tento bod je charakterizován napětím σ_x a elastickým přetvořením ε_x^e v čase t_1 . V čase t_1 současně dosahuje napětí σ_x hodnoty meze kluzu R_e . A konečně bod 1 na křivce napěťového cyklu $\sigma_x(t)$ je následně získán jako průsečík svislé čáry vedoucí z bodu 1 teplotního cyklu a vodorovné čáry z bodu 1 deformačně-napěťové křivky. Stejným způsobem je možné získat i ostatní body (2 až 5) na křivce napěťového cyklu $\sigma_x(t)$.

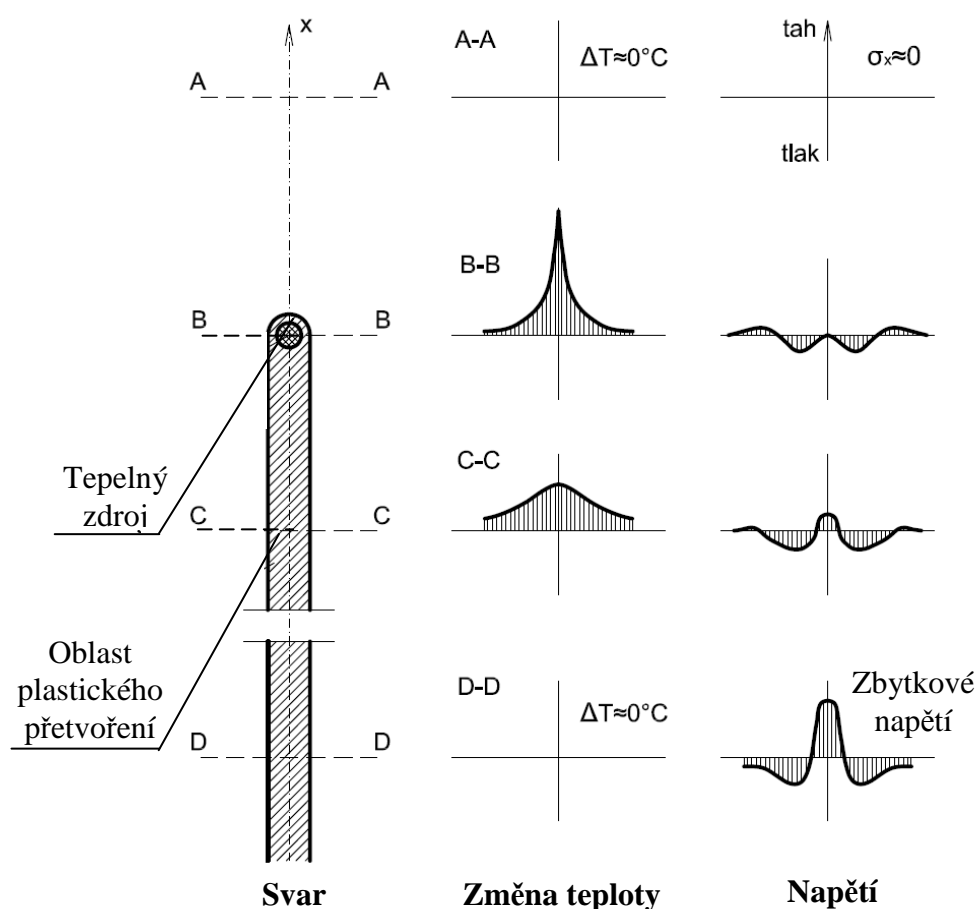
Bod 2 koresponduje s maximální dosaženou teplotou na křivce teplotního cyklu a tím i s maximální hodnotou tlakového plastického přetvoření. Při ochlazení z času t_2 do času t_3 dochází vlivem poklesu teploty k odlehčování z bodu 2 do bodu 3. V čase t_3 je elastické napětí a přetvoření rovno nule. V časovém intervalu t_3 až t_4 narůstá napětí a přetvoření (v tahové elastické oblasti) dle diagramu σ (ε^{ep}). V čase t_4 vzniká opět plastické přetvoření opačného znaménka. Čas t_5 reprezentuje stav po kompletním ochlazení s finální hodnotou zbytkové napjatosti.

3.2.3 Formování zbytkové napjatosti ve vztahu k tepelnému zdroji

Obrázek **obr. 3.2.3.1** [27, 28] schematicky znázorňuje změny teploty a podélného napětí v průběhu svařování. Šrafovaná oblast v ose svaru vyznačuje oblast, kde dochází ke vzniku plastických přetvoření. Řez A-A se nachází před tepelným zdrojem a není jím ještě dostatečně tepelně ovlivněn. Teplotní změny způsobené svařováním jsou zatím téměř rovny nule. Naproti tomu v řezu B-B, který protíná tepelný zdroj, dochází k poměrně strmému nárůstu teplotní odezvy. V určité vzdálenosti za tepelným zdrojem (řez C-C) dochází ke snížení maximální teplotní špičky. Nakonec dostatečně daleko od zdroje (řez D-D) nastává rovnovážný teplotní stav, kde jsou opět teplotní změny téměř rovny nule.

Protože řez A-A není ovlivněn tepelným zdrojem, teplotní napětí je rovno nule. Přímo v oblasti tepelného zdroje, řez B-B, je teplotní napětí blízké nule, protože roztavený svarový materiál má velice nízké mechanické vlastnosti, které nezpůsobí významnější zatížení. Ve větší vzdálenosti od tepelného zdroje je podélné napětí tlakové. To je způsobeno omezením

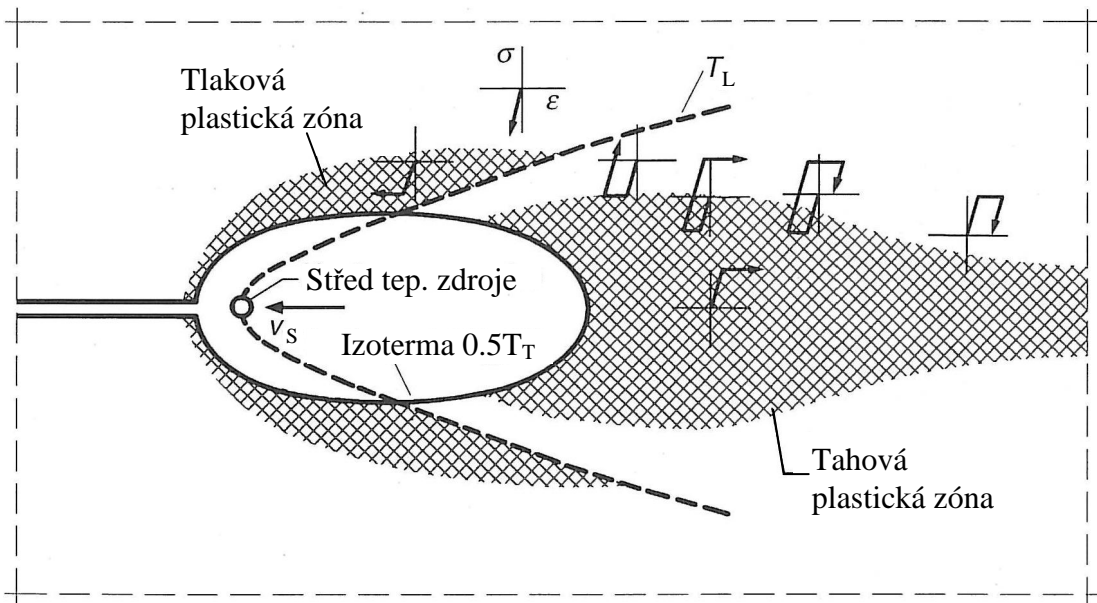
expanze roztaveného materiálu okolním chladnějším materiálem. Protože v oblasti ovlivněné vysokou teplotou dochází k poklesu hodnot meze kluzu, podélné napětí dosáhne meze kluzu základního materiálu zahřátého na stejnou teplotu. Tím vznikne podélné tahové napětí dále od svaru spolu s tlakovým napětím v oblasti blízko svaru. V řezu C-C dochází k ochlazení svarového a sousedního základního materiálu. Z tohoto důvodu dochází v této oblasti ke smršťování materiálu, čímž vzniká tahové podélné napětí. Tak jak se zvětšuje vzdálenost od osy svaru, nabývá podélné napětí nejprve tlakových hodnot, které dále přecházejí do tahových. Nakonec v řezu D-D, vznikají podélná tahová napětí dosahující vysokých hodnot v oblasti svaru a podélná tlaková napětí vznikající dále od osy svaru. Protože je řez D-D dostatečně daleko za tepelným zdrojem a již nedochází k významným změnám rozložení napjatosti, lze toto napětí považovat za zbytkové napětí po svařování.



Obr. 3.2.3.1 Schematická ilustrace změn teploty a napětí v průběhu svařování

Termomechanika formování zbytkových napětí v těsné blízkosti tepelného zdroje je schematicky ilustrována na **obr. 3.2.3.2** [1]. Uvnitř vyznačené izotermy (čárkovaná čára reprezentující teplotu o hodnotě cca $0.5T_T$), která vzniká kolem pohybujícího se tepelného zdroje, dochází v materiálu k poklesu napětí k nízkým hodnotám v důsledku snížení hodnot meze kluzu materiálu při vysokých teplotách. Tato oblast je proto na obrázku nahrazena prázdným oválem spojeným s pokračující drážkou ve směru svařování. Na čárkované parabole, jako křivce aproximující teplotní izotermy, je vyznačena pozice s nejvyšší lokální teplotou T_L . Před křivkou dochází k lokálnímu nárůstu teploty a za ní k lokálnímu poklesu.

Z pohledu deformačně-napěťové odezvy dochází k následujícím jevům. Před křivkou vzniká v důsledku kladných hodnot teplotních přetvoření při zahřívání oblast tlakových plastických přetvoření. Opačný případ nastává za křivkou, kde při ochlazování vznikají záporná teplotní přetvoření způsobující vznik tahových plastických přetvoření. Pro ilustraci jsou dále v různých bodech znázorněny zatěžovací cykly pomocí schematických napěťově-deformačních křivek bez teplotní závislosti. Ovšem je třeba poznamenat, že výše uvedený popis formování zbytkových napětí je nutné chápat pouze jako zjednodušený. Ve skutečnosti (prostorový problém) probíhá formování zbytkových napětí složitějším způsobem.



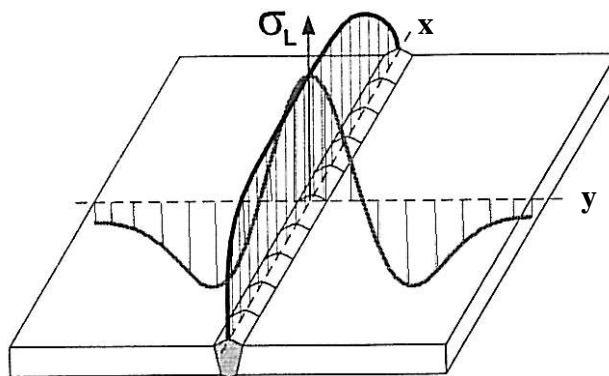
Obr. 3.2.3.2 Průběhy lokálních deformačně-napěťových odezvy v blízkosti pohybujícího se tepelného zdroje

3.3 Typy průběhů zbytkové napjatosti

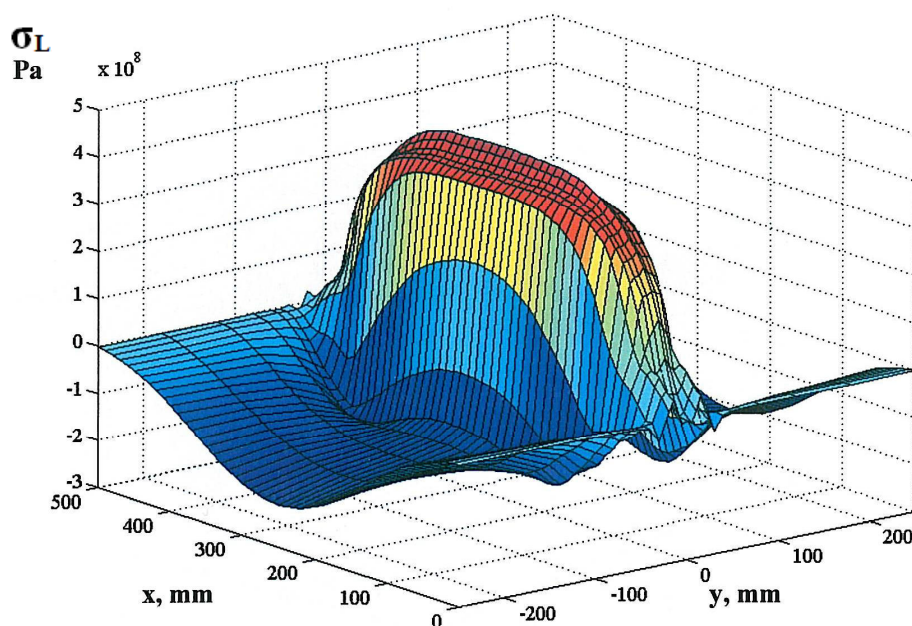
Výše uvedená problematika [1, 26, 29] je vysvětlena na případu obdélníkové desky svařené jedním přímým svarem. Zbytková napjatost je pro jednoduchost reprezentována pouze membránovou napjatostí v rovině desky s vyloučením ohybových napětí. V podkapitolách 3.3.1 až 3.3.2 jsou popsány rozdílné mechanismy vzniku zbytkové napjatosti po svařování v podélném a příčném směru.

3.3.1 Podélná zbytková napjatost

Obecný příklad průběhu podélné zbytkové napjatosti je uveden na **obr. 3.3.1.1** [29] a konkrétní výpočtový příklad reprezentující podélnou zbytkovou napjatost generovanou v podmínkách svařování pod tavidlem znázorňuje **obr. 3.3.1.2** [26].

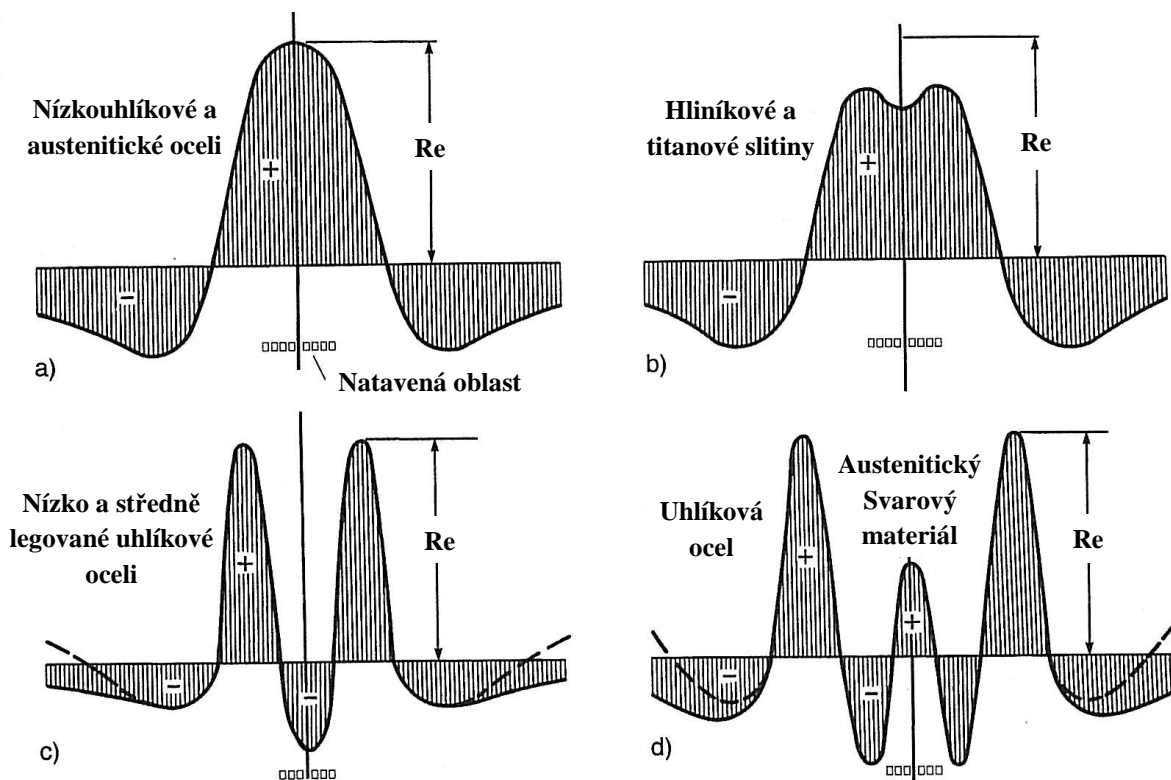


Obr. 3.3.1.1 Obecný průběh podélné zbytkové napjatosti σ_L



Obr. 3.3.1.2 Průběh podélné zbytkové napjatosti – simulace svařování pod tavidlem

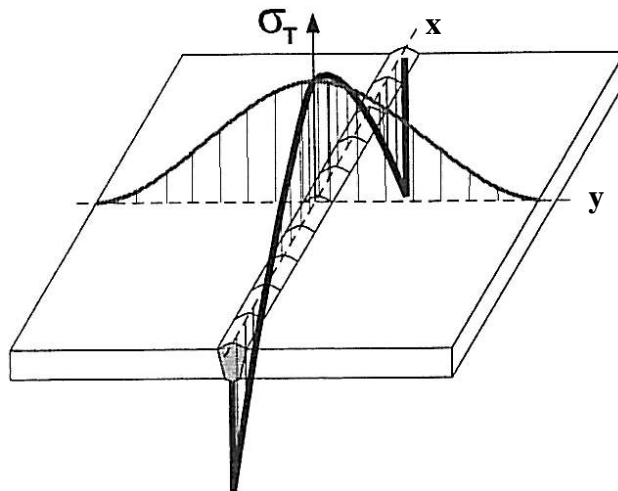
Podélná zbytková napětí jsou výsledkem podélného smrštění chladnouceho svarového materiálu. Tahová napětí jsou omezena na oblast svaru a jejich maximální hodnoty mohou být rovny nebo přesahovat mez kluzu materiálu (získána ze standardní zkoušky jednoosým tahem) (viz **obr. 3.3.1.3 a**). V okolní oblasti směrem od svaru přechází strmě zbytková napjatost z tahové do tlakové. Tento průběh zbytkové napjatosti je typický pro nízkouhlíkové a austenitické oceli. Téměř totožný průběh zbytkové napjatosti je i v případě slitin hliníku a titanu (viz **obr. 3.3.1.3 b**), ovšem s tím rozdílem, že maximální špička zbytkové napjatosti v ose svaru nedosahuje hodnot meze kluzu materiálu. Tento pokles napětí je pozorován zejména v ose svaru u hliníkových slitin (změkčení materiálu). V případě nízko a středně legovaných uhlíkových ocelí je průběh zbytkové napjatosti dle **obr. 3.3.1.3 c**). Zbytková napjatost v ose svaru se posouvá do tlakových oblastí v důsledku mikrostrukturních transformací při nižších teplotách (zejména martenzitická přeměna), zatímco v TOO základního materiálu dochází k nárůstu zbytkových napětí na maximální tahová (hodnoty na úrovni nebo přesahující mez kluzu). Složitější průběh zbytkových napětí vznikne, pokud je uhlíková ocel svařena austenitickým výplňovým materiálem (viz **obr. 3.3.1.3 d**). V ose svaru je relativně nízká tahová napjatost, zatímco vlevo a vpravo od osy svaru v oblasti TOO vznikají tlaková maxima vlivem transformačních procesů. Původní tahová maxima (opět dosahující nebo přesahující úroveň hodnoty meze kluzu) vyskytující se v TOO z předešlého případu (pouze uhlíková ocel) se posunou dále směrem od svaru. Obecně lze konstatovat, že v případě použití rozdílných výplňových a základních materiálů může docházet ke vzniku komplikovaných průběhů zbytkové napjatosti.



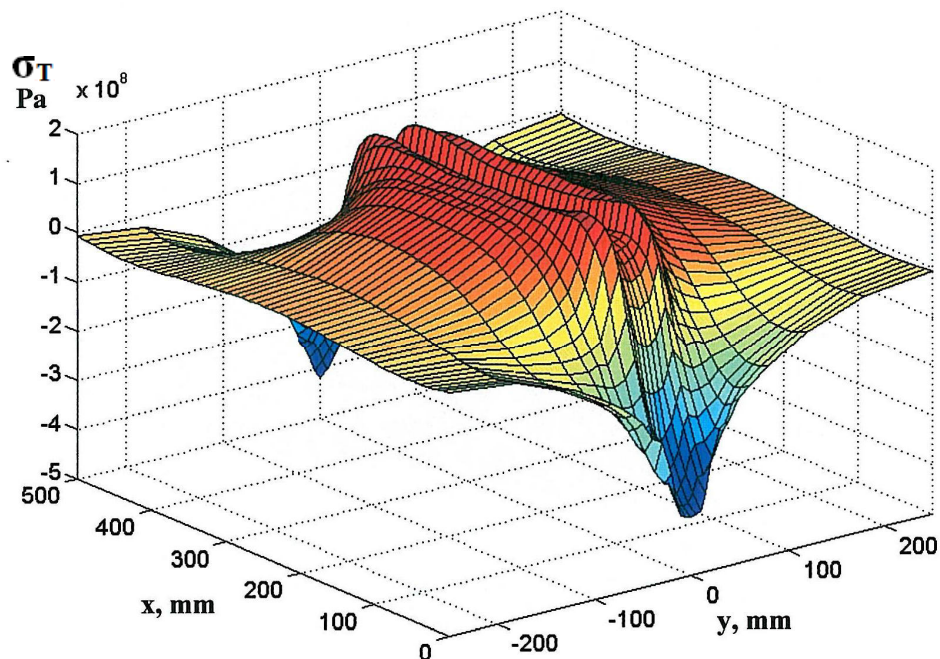
Obr. 3.3.1.3 Průběhy podélné zbytkové napjatosti v závislosti na typu materiálu [1]

3.3.2 Příčná zbytková napjatost

Obecný příklad průběhu příčné zbytkové napjatosti je uveden na **obr. 3.3.2.1** [29] a konkrétní výpočtový příklad reprezentující příčnou zbytkovou napjatost generovanou v podmínkách svařování pod tavidlem znázorňuje **obr. 3.3.2.2** [26].



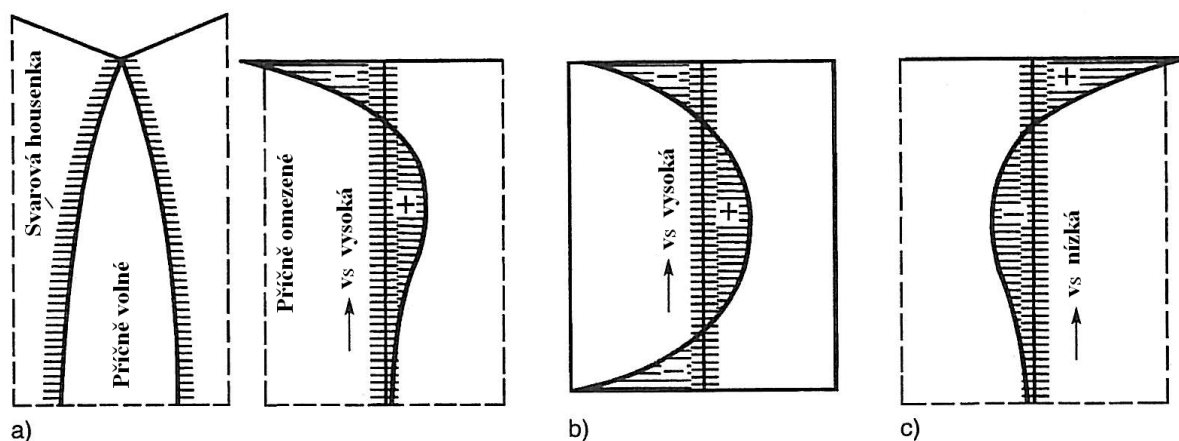
Obr. 3.3.2.1 Obecný průběh příčné zbytkové napjatosti σ_T



Obr. 3.3.2.2 Průběh příčné zbytkové napjatosti – simulace svařování pod tavidlem

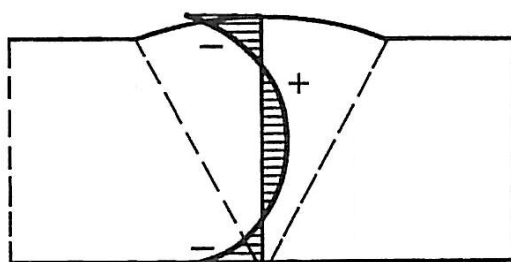
Příčná zbytková napětí vznikají vlivem příčného smršťování chladnoucího svařového materiálu, zejména v případě tuze upnutých okrajů svařované desky. Příčná zbytková napětí nejsou omezena pouze na úzkou oblast v blízkosti svaru, ale zahrnují rovněž vzdálenější okolní oblast. Za předpokladu dostatečně pružného upnutí zůstávají příčná zbytková napětí ve

vzdálenější oblasti od svaru pod mezí kluzu. V případě obdélníkové desky (dlouhá upnutá deska) s volnými okraji má také na příčnou zbytkovou napjatost vliv zejména podélné smrštění svarového materiálu. Jak je znázorněno na **obr. 3.3.2.3 a)**, podélné smrštění způsobené chladnutím svarového materiálu vede u volné desky k rozevírání svarové mezery. V případě omezení okrajů desky v příčném směru již nedochází k rozevírání svarové mezery díky působení příčných zbytkových napětí proti směru rozevírání. Na **obr. 3.3.2.3 a)** (dlouhá upnutá deska) a **obr. 3.3.2.3 b)** (krátká upnutá deska) jsou uvedeny průběhy příčné zbytkové napjatosti v podélném směru pro případ rychle se pohybujícího tepelného zdroje. Tahová zbytková napjatost je dominantní přibližně uprostřed délky desky a směrem k okraji přechází do tlakových hodnot. Naopak v případě svařování dlouhé upnuté desky **obr. 3.3.2.3 c)** pomalu se pohybujícím tepelným zdrojem vzniká přibližně uprostřed desky oblast tlaku a směrem k okraji desky přechází do tahu (vznik tahu v oblasti, kde došlo nejpozději ke zchladnutí svarového kovu).



Obr. 3.3.2.3 Průběhy příčné zbytkové napjatosti v závislosti na způsobu upnutí a rychlosti svařování [1]

Výše uvedená příčná zbytková napětí konstantní přes tloušťku desky jsou ovlivněna příčným napětím proměnným přes tloušťku desky. To vzniká na základě rozdílných ochlazovacích podmínek na povrchu (tlaková oblast) a uvnitř desky (tahová oblast), jak je znázorněno na **obr. 3.3.2.4**. Pokud jsou okraje desky uchyceny tak, že brání jejich ohybu (zabráněná úhlová deformace), pak může ještě dojít ke vzniku ohybové napjatosti.

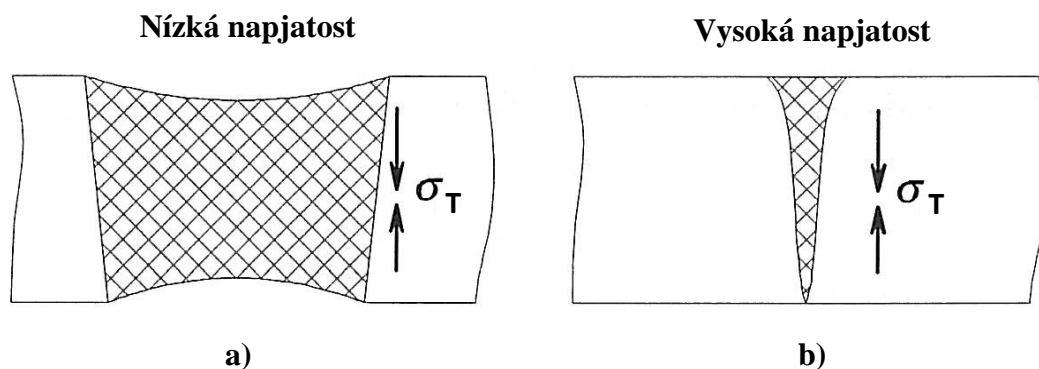


Obr. 3.3.2.4 Příklad nelineárního podílu příčné zbytkové napjatosti přes tloušťku svařované desky

Pokud je tloušťka desky dostatečně velká, dochází přinejmenším ke vzniku příčné zbytkové napjatosti (ve směru tloušťky desky) uvnitř desky. Ta může být v tahové oblasti v případě chladnutí svarového materiálu bez transformací nebo v tlakové oblasti, pokud jsou při ochlazování přítomny transformace materiálu. První zmíněný napěťový stav vede ke vzniku trojosé tahové napjatosti, která podporuje vznik trhlin.

V případě vícevrstvého svařování velkých tlouštěk vzniká zbytková napjatost zvyšující nehomogenitu přes tloušťku desky. V průběhu chladnutí posledních navařených svarových housenek dochází v této oblasti k největšímu nárůstu podélných a příčných zbytkových napětí. To je způsobeno vysokou odolností již navařeného výplňového materiálu (vysoká tuhost) proti kontrakci v podélném a příčném směru. Naopak v případě předchozích svarových housenek, které byly teplotně ovlivněny následujícími svarovými housenkami, dochází k částečnému snížení a přerozdělení zbytkové napjatosti.

Příklad vlivu volby svařovacích technologií na velikost příčného zbytkového napětí ve směru tloušťky materiálu je uveden na **obr. 3.3.2.5 [26]**. Schéma **a)** znázorňuje svařování středně tlustých desek metodou SAW na jeden průchod nebo jakýkoli druh svařování tenkých desek. Takové procesy jsou obvykle charakterizovány širší plasticky deformovanou zónou. V tomto případě je materiál v blízkosti osy svařování schopen "dýchat volněji" ve směru tloušťky materiálu. Proto zde hodnoty příčných zbytkových napětí dosahují nízkých hodnot. Schéma **b)** reprezentuje případ svařování středně tlusté desky metodou EBW. Kov natavený ve velice úzké oblasti (úzká plastická zóna) v blízkosti osy svařování je omezen v pohybu ve směru tloušťky materiálu. Proto v tomto případě dochází ke vzniku vysokých hodnot příčných zbytkových napětí ve směru tloušťky materiálu.



Obr. 3.3.2.5 Závislost příčné zbytkové napjatosti ve směru tloušťky desky na technologii svařování

4 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 nadefiniuje 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, 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. 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. 4.1**. Stručný popis všech tří etap na základě [1, 3, 20, 22, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36], je uveden v následujících podkapitolách.

4.1 Nalezení vstupních parametrů diagramu transformačních přeměn

Metalurgicky je materiál popsán procentuálním podílem jednotlivých fází, které v ocelích mohou vzniknout během metalurgických přeměn. Základními fázemi, které lze při svařování a tepelném zpracování ocelí popsat jsou ferit, perlit, bainit, martenzit a austenit a jejich modifikace, které mohou vzniknout vhodným tepelným působením na základní fáze – popuštěný martenzit, horní bainit, dolní bainit apod. Každá jednotlivá fáze má rozdílné teplotní a mechanické vlastnosti a má zásadní vliv na výslednou deformačně-napěťovou odezvu materiálu (úroveň a rozložení zbytkových napětí), zejména pak ve svaru a v TOO. Pro popis kinetiky transformačních přeměn v daném bodě struktury lze v programu SYSWELD použít následujících modelů přeměn. Prvním z nich je Johnson-Mehl-Avramiho model. Tento vztah je funkcí času a teploty. Popisuje kinetiku transformačních přeměn a určuje podíl vznikajících struktur. V průběhu svařování je však teplota proměnná a mění se rovněž i rychlost změny teploty v čase. Proto byl Leblondem upraven Johnson-Mehl-Avramiho model o časové zpoždění transformačních přeměn oproti rovnovážnému stavu. Pro určení transformačních koeficientů vychází Leblondův model ze znalosti diagramu anizotermického rozpadu austenitu. Leblondova úprava Johnson-Mehl-Avramiho modelu představuje poloempirický vztah zachovávající kinetiku transformačních přeměn a kopíruje ARA diagram v celém rozsahu ochlazování. Výše zmíněné modely slouží k popisu difúzních přeměn. Pro popis martenzitické bezdifúzní přeměny je v programu SYSWELD použit Koistinen-Marburgerův model. Pro nalezení vstupních parametrů diagramu transformačních přeměn je v programu SYSWELD dostupný speciální modul, jehož výsledkem je textový a grafický výstup. Podrobnější informace o problematice fáze ohřevu (vliv na teploty A_{c1} a A_{c3}) a ochlazování (klasické a svářečské ARA diagramy) jsou uvedeny v [3, 4].

4.2 Teplotně-strukturní analýza

Způsob zadávání teploty (TZ) nebo vneseného tepla (svařování) je jedním z klíčových faktorů pro úspěšnou predikci zbytkové napjatosti. V případě TZ se definují teplotní podmínky pomocí teplotního cyklu, který se obecně skládá z ohřevu, výdrže a ochlazení. V případě svařování se v současné době používají dva způsoby zadávání vneseného tepla do objemu modelovaných svarových housenek. První z nich představuje klasický způsob řešení numerických analýz svařování, při němž se vnesené teplo zadává do materiálu pomocí pohybujícího se modelu tepelného zdroje. V programu SYSWELD jsou dostupné dva typy modelů zdroje tepla. Prvním je kuželový Gaussův typ zdroje pro svařování vysokoenergetickými metodami (EBW, LBW) a druhým je dvouelipsoidní Goldakův model zdroje pro metody obloukového svařování (MAG, TIG, atd.). Simulace pohybu tepelného zdroje je dána závislostí na čase a souřadnicích v prostoru. Množství vneseného tepla musí odpovídat skutečnosti, a proto je celý svařovací proces analyzován postupně pro každý časový okamžik svařování. Metoda vyžaduje použití relativně jemné diskretizace v oblasti svarových housenek a malý integrační krok s ohledem na rychlost svařování. Výhodou metody jsou přesnější výsledky analýz (z hlediska napěťové odezvy), nevýhodou dlouhé výpočtové časy. Podrobnější popis problematiky aplikace modelů tepelného zdroje je uveden především v [3].

Druhým způsobem je zadávání vneseného tepla pomocí metody „macro heat deposit“ (MBD). U metody MBD se neprovádí zadání tepla do materiálu pomocí pohybujícího se modelu tepelného zdroje, ale vložením celkového vneseného tepla do určitého objemu materiálu najednou. Předpokladem správné aplikace MBD metody je, že výpočtové vnesené teplo musí odpovídat vnesenému teplu skutečného procesu svařování. To vyžaduje specifické zadání vstupní energie do jednotlivých svarových housenek modelu. Celkové vnesené teplo je v MBD analýze „vloženo“ do celé svarové housenky "držením" dané teploty v příslušných uzlech svarové housenky po přesně stanovený (vypočtený) čas. Výhodou této metody je výrazné zkrácení výpočtových časů. Nevýhodou jsou o něco méně přesné výsledky z hlediska napěťové odezvy. Podrobnější popis aplikace metody MBD je uveden v [31].

V teplotní analýze je možné zohlednit vliv transformačního latentního tepla a dále latentního tepla při změně skupenství. Na základě výsledků teplotně-strukturní analýzy lze určit také výslednou tvrdost struktury. Výpočet tvrdosti struktury je prováděn dle empirických vztahů, které vyplývají z chemického složení materiálu, struktury materiálu a rychlosti ochlazení přes charakteristické teploty. Další možností teplotně-strukturního řešení je zjištění velikosti austenitického zrna.

4.3 Mechanicko-strukturní analýza – EP přístup

K popisu elasto-plastického chování materiálu se zahrnutím metalurgických transformací je v programu SYSWELD možné použít následující konstitutivní modely materiálu vycházející z Misesovi teorie plasticity:

- Ideálně plastický model materiálu
- EP model materiálu s izotropním zpevněním
- EP model materiálu s kinematickým zpevněním
- EP model materiálu s kombinací kinematického a izotropního zpevnění

EP model materiálu s izotropním zpevněním je vhodný především pro postupně narůstající zatížení, které nemění oblast zatížení ve smyslu tahu a tlaku. Méně vhodný je pro cyklické zatěžování (vícevrstvé svařování), jelikož výsledkem je ve většině oblastí svarového spoje vyšší vypočtená zbytková napjatost (nadhodnocená kumulace plastického přetvoření) ve srovnání s předpokládanou reálnou zbytkovou napjatostí. Tuto skutečnost potvrzuje i publikace [20]. Nicméně i tak tento model materiálu zatím patří mezi nejpoužívanější.

EP model materiálu s kinematickým zpevněním, zohledňující Bauschingerův efekt, je vhodný pro řešení cyklicky zatěžovaných konstrukcí, tzn. měl by být vhodný pro případ vícevrstvého svařování. Bauschingerův efekt reprezentuje rozdílnost mezi kluzu v tahu a tlaku, tzn. po předchozím tahovém zatěžování tělesa nad mez kluzu se tlaková mez plasticity snižuje. Ovšem např. na základě studie [20] bylo zjištěno, že pokud je EP model materiálu s kinematickým zpevněním aplikován v případě numerických analýz svařování (oblast vysokých teplot), Bauschingerův efekt přestává být aktivní (materiál se chová téměř ideálně

plasticky – pro analýzy svařování nevhodný) a dochází k podhodnocení vypočtené zbytkové napjatosti, zejména pak špiček napětí v TOO svarového spoje. I podle mnoha dalších autorů je používání kinematického modelu deformačního zpevnování z pohledu finálních výsledků na straně nebezpečné.

Kombinovaný EP model materiálu vyžaduje zadávání stejných vstupních parametrů jako izotropní a kinematický model s jedním rozdílem a tím je tzv. piso koeficient, který nabývá hodnot v intervalu 0 až 1. Ten udává, jak velká část deformačního zpevnování případně na izotropní nebo kinematické chování materiálu. Literatura [30] udává pro analýzy svařování hodnotu piso koeficientu 0,2 až 0,5. Piso koeficient je rovněž možné stanovit experimentálně (nutnost specializovaných a drahých přístrojů). Podle publikace [20] dochází při použití kombinovaného modelu, zejména s převažujícím kinematickým deformačním zpevnováním, také k podhodnocení nejvyšších tahových špiček zbytkové napjatosti.

Výpočet deformačně-napěťové odezvy v sobě zahrnuje teplotní a metalurgické změny. Vliv teplotní historie na výpočet napjatosti zahrnuje změnu modulu pružnosti, meze kluzu a teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě. Vliv metalurgické historie je obsažen v následujících čtyřech základních faktorech:

a) Vliv metalurgické struktury a velikosti austenitického zrna na mechanické vlastnosti. Výsledné mechanické vlastnosti řešené struktury jsou stanoveny z mechanických vlastností jednotlivých fází. Každá fáze má odlišné chování materiálu a zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti.

b) Vliv rozdílné roztažnosti a kontrakce α -fází a γ -fáze vznikající jako důsledek rozdílného teplotního chování jednotlivých fází. Na základě teplotní roztažnosti je možné vypočítat přetvoření vyvolané buď pouze teplotním faktorem (1) nebo přetvoření vyvolané teplotním a metalurgickým faktorem (2).

$$\varepsilon^{th}(T) = \alpha(T) \cdot (T - T_0) \quad (1)$$

$$\varepsilon^{th}(P, T) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \varepsilon_i^{th}(T) \quad \text{pro } i=1,2,\dots,n \text{ fází} \quad (2)$$

kde: $\varepsilon^{th}(T)$ - teplotní přetvoření závislé na teplotě [-]

$\varepsilon^{th}(P, T)$ - teplotní přetvoření závislé na teplotě a metalurgickém faktoru [-]

$\alpha(T)$ - teplotní roztažnost závislá na teplotě [K^{-1}]

T - teplota [$^{\circ}C$]

T_0 - počáteční teplota [$^{\circ}C$]

P_i - podíl fáze [-]

Použití ε^{th} v závislosti na teplotě a jednotlivých fázích je velice výhodné, neboť umožňuje postihnout jev, kdy v okamžiku ztuhnutí tekutého kovu je nulové přetvoření. V okamžiku ztuhnutí se austenitu, který se jako první transformuje z taveniny, přiřadí $\varepsilon^{th} = 0$ a

dále se výpočet provádí s jeho smrštěním a vlivem na okolí svaru. Podobného principu je využíváno i v průběhu transformací, kdy právě transformovaná fáze má také nulové teplotní přetvoření.

c) Vliv rozdílného deformačního zpevnění H [MPa] fází v průběhu metalurgických přeměn. Plastické chování materiálu se projevuje generováním a pohybem dislokací. Narazí-li dislokace na překážku v podobě hranic zrn, legujících prvků, apod., jejich pohyb se zastaví a teprve po dodání další energie se uvedou dislokace opět do pohybu. V průběhu transformací se velikost plastických přetvoření a deformační zpevnění materiálu snižuje v důsledku pohybu dislokací. Každá fáze ve struktuře má odlišný zpevňující charakter. Pro určení zpevnění materiálu jako celku mají zásadní vliv dva deformační parametry zpevnění α -fáze a γ -fáze. V případě martenzitické transformace, kde jsou deformace velice malé, se deformační zpevnění martenzitu popisuje pomocí paměťového koeficientu materiálu vyjadřující anizotropní chování martenzitu. Pro výpočet deformačního zpevnění H [MPa] ($H = \sigma - Re$), jako přírůstek napětí k mezi kluzu Re , je použita rovnice Ramberg-Osgood ve tvaru $\sigma = k \cdot (\varepsilon^{pl})^n$:

$$\varepsilon^{pl}(T) = \left(\frac{\sigma}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$\varepsilon^{pl}(P, T) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \varepsilon_i^{pl}(T) \quad \text{pro } i=1, 2, \dots, n \text{ fází} \quad (4)$$

kde: $\varepsilon^{pl}(T)$ - plastické přetvoření v závislosti na teplotě [-]
 $\varepsilon^{pl}(P, T)$ - plastické přetvoření v závislosti na teplotě a metalurgickém faktoru [-]
 σ - vypočtené napětí [MPa]
 k, n - měřené materiálové charakteristiky [MPa], [-]
 P_i - podíl fáze [-]

d) Vliv transformační plasticity. V průběhu fázových transformací, které probíhají v poli napětí, vzniká plastické přetvoření způsobující redukci napětí k nule. Tento jev je způsoben změnou objemu krystalické mřížky při rozpadu austenitu na α -fáze. Redukce napětí probíhá vždy na úkor nejměkčí fáze a to bez vnějšího napětí. Faktor popisující tento důležitý jev se musí zahrnout do výrazu pro celkové přetvoření (6). Jestliže není transformační plasticita zahrnuta do výpočtu, může dojít k rozdílu ve výsledných hodnotách zbytkových napětí a to řádově v desítkách až stovkách MPa. Výraz pro transformační plasticitu je založen na teoretických a experimentálních studiích a je vyjádřen rovnicí (5):

$$\varepsilon^{tp} = -\frac{2}{3} \cdot k \cdot \sigma \cdot f(p) \quad (5)$$

kde: ε^{tp} - transformační plasticita [-]
 σ - vypočtené napětí [MPa]
 k - koeficient transformační plasticity stanovený na základě dilatometrického testu ($k = 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$)
 $f(p)$ - funkce, vyjadřující podíl nerozpadlého austenitu ve struktuře [-]

Celkové přetvoření, ze které je počítána výsledná napjatost, lze vyjádřit pomocí Leblondova modelu (6):

$$\varepsilon_T = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{tp} \quad (6)$$

kde: ε^{el} - elastické přetvoření [-]
 ε^{th} - teplotní přetvoření [-]
 ε^{pl} - plastické přetvoření [-]
 ε^{tp} - transformační plasticita [-]

4.4 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.

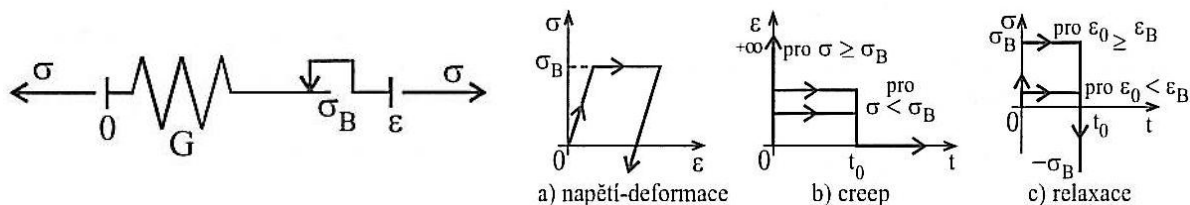
4.4.1 Porovnání EP a EVP modelu materiálu

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.

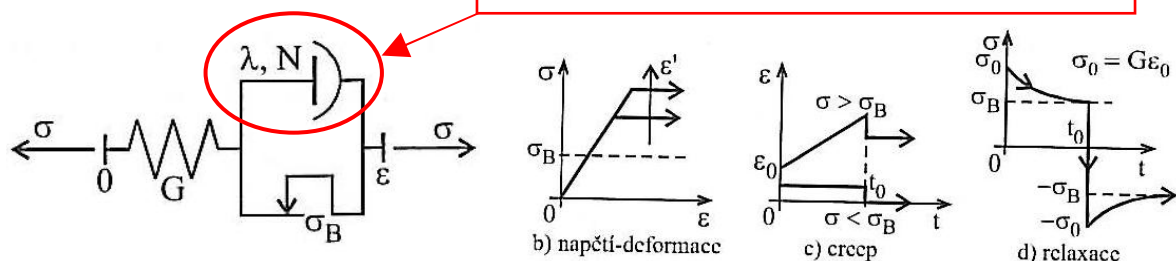
Relaxace napětí - je proces, při kterém v zatíženém tělese dochází k poklesu napětí při konstantním přetvoření (deformaci), přičemž při návratu k původní nedeformované konfiguraci tělesa v něm vzniknou napětí opačného smyslu, které velikostí odpovídají předcházejícímu poklesu a následně v čase opět klesají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

Schematické znázornění fyzikálních principů jednotlivých modelů materiálu pomocí jednoduchých reologických modelů [32] je uvedeno na **obr. 4.4.1.1** a **obr. 4.4.1.2**.



Obr. 4.4.1.1 Základní charakteristiky elasto-plastické látky

Zohlednění časově závislých deformačních dějů



Obr. 4.4.1.2 Základní charakteristiky elasto-viskoplastické látky

G – modul pružnosti ve smyku [MPa]

σ_B – blokovací napětí, v tomto případě 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 hodnotu 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.

Následující vztahy (10) a (11), vycházející ze vztahu (9) dle [30], vyjadřují příklad zjednodušeného zápisu viskoplastické složky přetvoření ε^{vp} vystupující v celkovém přetvoření ve vztahu (8). Vztah (10) je závislostí ε^{vp} na teplotě, napětí a čase. Vztah (11) je potom závislostí ε^{vp} také na podílu jednotlivých fází ve struktuře.

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon^{vp})^{1/M} \cdot (\dot{\varepsilon}^{vp})^{1/N} \quad (9)$$

$$\varepsilon^{vp}(T, \sigma, t) = \left[\frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{N+M}} \quad (10)$$

$$\varepsilon^{vp}(P, T, \sigma, t) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \varepsilon_i^{vp}(T, \sigma, t) \quad \text{pro } i=1,2,\dots,n \text{ fází} \quad (11)$$

kde: $\dot{\varepsilon}^{vp}$ - rychlost viskoplastického přetvoření [1/s]

$\varepsilon^{vp}(T, \sigma, t)$ - viskoplastické přetvoření závislé na teplotě, napětí a čase [-]

$\varepsilon^{vp}(P, T, \sigma, t)$ - viskoplastické přetvoření závislé na teplotě, napětí, čase a fázích [-]

K, M, N - parametry vyjadřující viskoplastické chování materiálu

σ - vypočtené napětí [MPa]

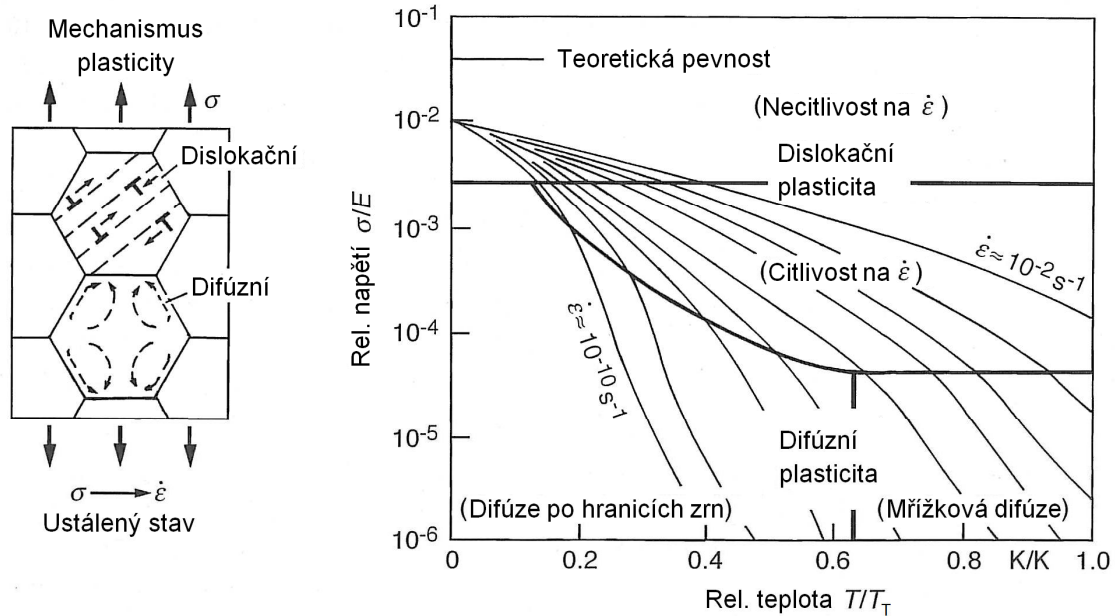
t - čas [s]

P_i - podíl fáze [-]

4.4.2 Význam použití EVP modelu materiálu

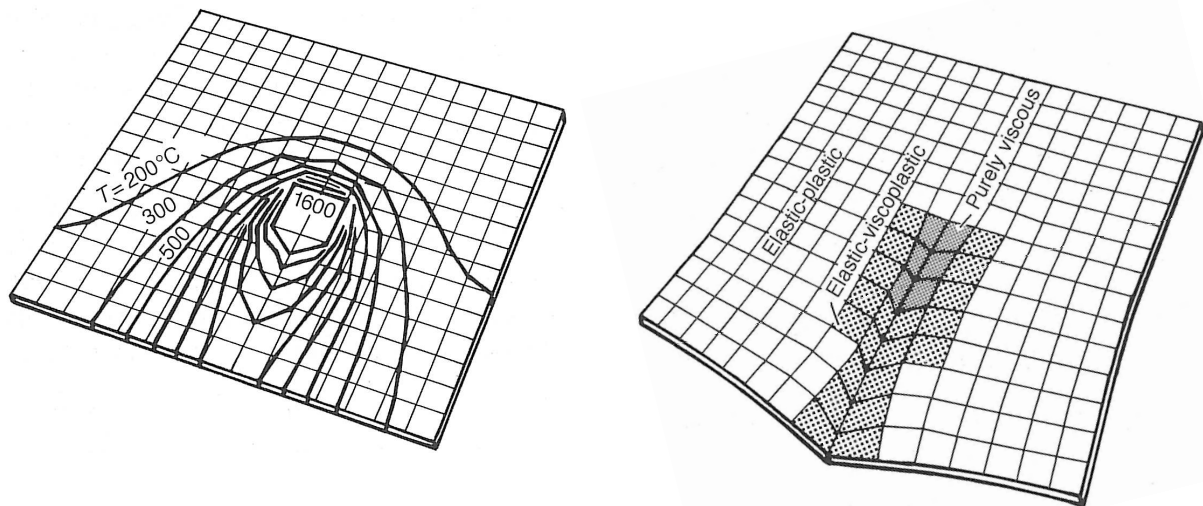
Touto problematikou se podrobně zabývá publikace [2], uvedená v kapitole 2.1 a dále literatura [1], stručně diskutovaná v následujícím textu. Mikrostrukturní mechanismus plastického přetvoření zahrnující viskózní efekty může být znázorněn a kvantifikován pomocí diagramu na **obr. 4.4.2.1 [1]**. Ten znázorňuje 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. 4.4.2.1 Popis vlivu viskoplastických efektů pomocí mapy deformačních mechanismů [1]

Teoreticky lze použití jednotlivých modelů materiálu v závislosti na teplotě rozdělit do tří oblastí dle **obr. 4.4.2.2** [1] (rozdílné aplikované konstitutivní rovnice). EP chování je možné předpokládat v teplotním rozsahu $T < 0.5T_T$, EVP chování v rozsahu $0.5T_T < T < 0.8T_T$ a čistě viskózní chování pro teploty $T > 0.8T_T$.



Obr. 4.4.2.2 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. 4.4.2.2, 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 vícevrstvěném 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.

4.4.3 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

$$\dot{\varepsilon}^{eq} = \left(\frac{\sigma^{eq} - \sigma^y}{K (\varepsilon^{eff})^{\frac{1}{M}}} \right)^N \quad \left. \vphantom{\dot{\varepsilon}^{eq}} \right\} \text{V závislosti na T, P} \quad (12)$$

respektive

$$f = \sigma^{eq} - \sigma^y - K (\varepsilon^{eff})^{1/M} (\dot{\varepsilon}^{eq})^{1/N} = 0$$

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

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

$$\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{vp}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} + \left(\frac{3 \cdot H \cdot \dot{\varepsilon}^{vp}}{2 \cdot C} \right)^{\frac{1}{P}} = \sigma \Rightarrow \dot{\varepsilon}^{vp} \quad \left. \vphantom{\dot{\varepsilon}^{vp}} \right\} \text{V závislosti na T, P} \quad (14)$$

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 [-]

4.5 Materiálové charakteristiky

Materiálové charakteristiky potřebné pro provedení numerických analýz svařování a tepelného zpracování (viz **tab. 4.5.1**) lze obecně rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou termofyzikální vlastnosti materiálu pro teplotně-strukturní analýzu a druhou jsou mechanické vlastnosti materiálu pro mechanicko-strukturní analýzu. Termofyzikální vlastnosti materiálu bývají v literatuře obecně dobře dostupné a rovněž nevykazují významné rozdíly pro různé typy materiálu (myslí se ve stejné kategorii materiálu), což nelze tvrdit o mechanických vlastnostech materiálu. Ty obvykle v literatuře dostupné nejsou a je nutné je získat z mechanických zkoušek provedených pro konkrétní materiál. Mechanické vlastnosti materiálu lze dále rozdělit podle EP nebo EVP výpočtového přístupu.

V případě EP výpočtového přístupu se mechanické vlastnosti materiálu získají ze standardních tahových a dilatometrických zkoušek. U EVP výpočtového přístupu se část mechanických vlastností materiálu získá opět ze standardních zkoušek, ale dále je ještě nutné provést měření nestandardních krátkodobých (v řádu hodin) relaxačních a creepových zkoušek. Podrobnější popis problematiky měření a vyhodnocení viskoplastických materiálových charakteristik je uveden v kap. 4.5.1.

Materiálové charakteristiky je nutné do analýzy zadávat vždy v závislosti na teplotě (od pokojové teploty až do teploty tavení materiálu) a v případě materiálů, které vykazují fázové přeměny, také v závislosti na typu struktury materiálu.

Tab. 4.5.1 Přehled materiálových charakteristik zadávaných do programu SYSWELD

Termofyzikální vlastnosti materiálu	
<ul style="list-style-type: none"> • Koeficient tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] • Měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] • Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] • Koeficient přestupu tepla ocel-vzduch β [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] • ARA diagram (pouze u polymorfních materiálu) 	
Mechanické vlastnosti materiálu - EP výpočtový přístup	Prováděné mechanické zkoušky
<ul style="list-style-type: none"> • Koeficient teplotní roztažnosti α [K^{-1}], respektive teplotního přetvoření ϵ^{th} [-] • Poissonovo číslo μ [-] • Modul pružnosti E [MPa] • Mez kluzu R_e [MPa] • Deformační zpevnění materiálu H [MPa] 	<ul style="list-style-type: none"> • Dilatometrická • Tahová

pokračování **tab. 4.5.1**

Mechanické vlastnosti materiálu - EVP výpočtový přístup Model č. 21	Prováděné mechanické zkoušky
<ul style="list-style-type: none"> • Koeficient teplotní roztažnosti α [K^{-1}], respektive teplotního přetvoření ϵ^{th} [-] • Poissonovo číslo μ [-] • Modul pružnosti E [MPa] • Relaxační napětí ("viskoplastická mez kluzu") σ^y [MPa] • Koeficient zpevnění K [MPa] • Exponent zpevnění M [-] • Exponent rychlosti přetvoření N [-] 	<ul style="list-style-type: none"> • Dilatometrická • Tahová • Relaxační • Creepová
Mechanické vlastnosti materiálu - EVP výpočtový přístup Model č. 31	Prováděné mechanické zkoušky
<ul style="list-style-type: none"> • Koeficient teplotní roztažnosti α [K^{-1}], respektive teplotního přetvoření ϵ^{th} [-] • Poissonovo číslo μ [-] • Modul pružnosti E [MPa] • Mez kluzu Re [MPa] • Deformační zpevnění materiálu H [MPa] • Koeficient zpevnění K [MPa] • Exponent rychlosti přetvoření n [-] • Viskoplastické parametry popisující sekundární creep H, C, P [-] 	<ul style="list-style-type: none"> • Dilatometrická • Tahová • Creepová

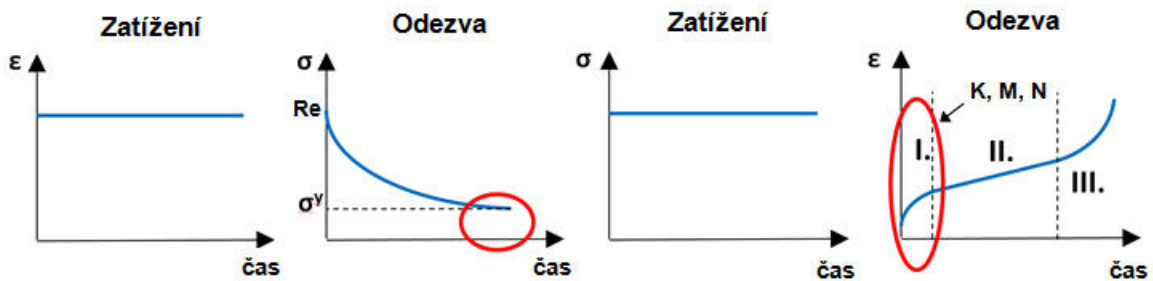
4.5.1 Měření a vyhodnocení mechanických vlastností materiálu pro EVP analýzu

Jak již bylo uvedeno v kap. 4.5, 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

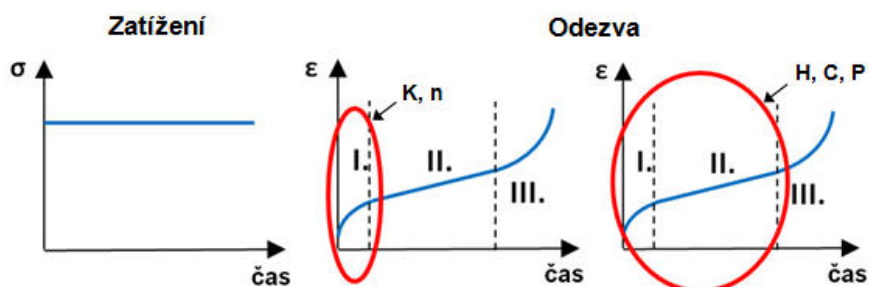
creepu. Pro získání relaxačního napětí σ^y musí být nejprve provedeny relaxační testy materiálu. Parametr σ^y lze chápat jako ustálenou hodnotu napětí, na kterou toto napětí poklesne z hodnoty konvenční meze kluzu v průběhu relaxačního testu. Parametry K, M, N lze získat z creepových zkoušek, konkrétně 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. 4.5.1.1**. Podrobný popis postupu získání viskoplastických parametrů pro jednotlivé metalurgické struktury a požadované teploty bude uveden v kap. 6.3.3.



Obr. 4.5.1.1 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. 4.5.1.2** (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. 4.5.1.2 Schematické znázornění creepové zkoušky s primární (vlevo) a primární a sekundární (vpravo) částí křivky pro stanovení viskoplastických parametrů

4.6 Možnosti experimentálního měření zbytkové napjatosti

Před vlastním provedením experimentálního měření zbytkové napjatosti je důležité si uvědomit, jakou dostupnou experimentální metodou a jak věrohodně je vůbec možné určit zbytkovou napjatost po svařování a TZ [22]. Dostupnými experimentálními metodami pro zjišťování zbytkových napětí jsou metoda odvrtávací, magnetoelastická, rentgenová a neutronová difrakce. Schematické rozdělení a stručný popis těchto metod je uveden v **tab. 4.6.1**. Další metodou, kterou bude pravděpodobně možné k tomuto účelu použít, je indentační metoda [37, 38]. Ovšem ta je zatím ještě ve vývoji v rámci výzkumného úkolu ÚAM Brno. Podrobný popis všech uváděných metod je dostupný v [24, 25, 35, 37, 39]

Tab. 4.6.1 Rozdělení a popis vybraných experimentálních metod [3, 24]

Metoda	Odvrtávací	Magnetoelastická	Rentgenová	Neutronová
Aplikovatelnost	rovinná homogenní napjatost na povrchu	feromagnetický materiál, rovinná napjatost	izotropní homog. materiál, polykrystalický, rovinná napjatost	izotropní homog. materiál, polykrystalický, prostorová napjatost
Druh analyzované zbytkové napjatosti	I. druhu	I.+II.+III. druhu	I. a II. nebo III. druhu	I. a II. nebo III. druhu
Měřený parametr	povrchové deformace	amplituda Barkhausenova šumu	změna meziatomových vzdáleností	změna meziatomových vzdáleností
Hloubka vyšetřování	0,02 - 15 mm	0,1 - 1 mm	1 - 50 μ m	do 100 mm
Problémy s hrubozrností a texturou	ne	ano	ano	ano
Kde je možné provést měření	ÚAM Brno VUT Brno	VUT Brno VŠB TU Ostrava	FJFI Praha VUT Brno VŠB TU Ostrava	UJV Řež

Experimentální metody pro měření zbytkové napjatosti jsou při standardním provedení věrohodně použitelné pouze při splnění jistých podmínek. Těmi jsou například homogenní rovinná napjatost na povrchu, homogenní i nehomogenní napjatost po tloušťce, hodnoty zbytkových napětí nepřekračující požadovaný násobek meze kluzu, experimentální měření jsou prováděna v oblasti lineárně elastických přetvoření, kde je platný Hookův zákon. Výše uvedené bývá většinou splněno v případě zbytkové napjatosti po TZ a to jak v oblasti dále od svaru, tak i v něm. Ovšem v případě napjatosti po svařování výše uvedené ve svarovém spoji a TOO splněno není (pouze dostatečně daleko od svaru). Aby bylo možné zhodnotit přínos aplikace EVP modelu materiálu, je nutné mít možnost provádět měření přímo ve svarovém spoji a TOO. Z výše uvedeného vyplývá, že při standardním provedení měření zmiňovanými metodami je i dnes stále obtížné ve svarovém spoji a TOO, především po svařování, dostatečně věrohodně stanovit úroveň zbytkové napjatosti. Jednou z možností je použití modifikované odvrtávací metody dle [25]. Ovšem i tam mohou nastat komplikace z důvodu nežádoucí deformace tenzometrických růžic lepením na tvarově členitý přechod základního materiálu a svarové housenky.

5 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Experimentální program se skládá ze dvou na sebe navazujících částí. V první části programu (viz kap. 5.1) byly nadefinovány a provedeny tři stejné modelové svarové spoje ve spolupráci s VŠB TUO [39]. Ty by měly sloužit ke vzájemnému porovnání reálného případu svařování a TZ s výpočtovým modelováním pomocí EP a EVP přístupu. Druhá část programu (viz kap. 5.2) zahrnovala provedení mechanických zkoušek ve spolupráci s ÚFM AVČR.

5.1 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:

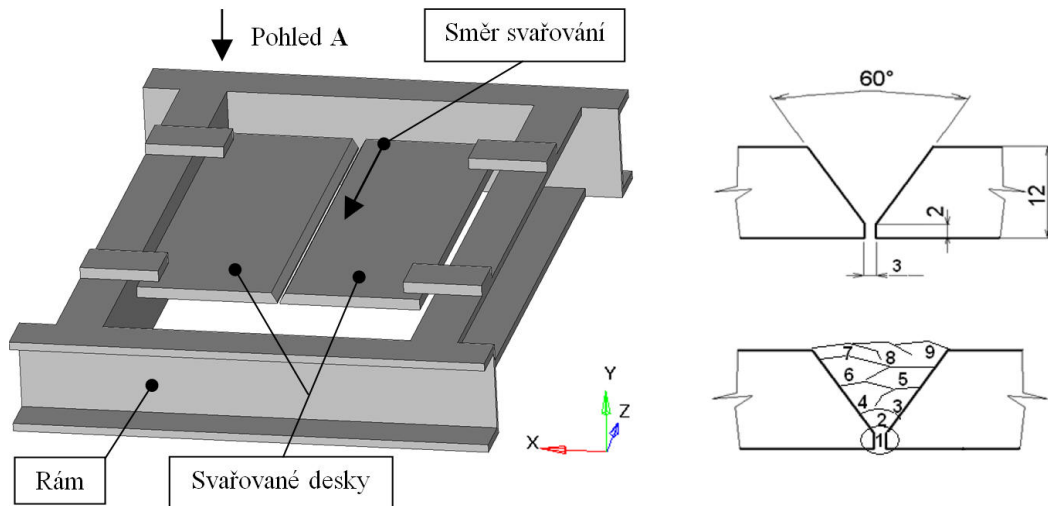
- Svaření modelového svarového spoje č. 1 - měření teplotních cyklů a stanovení výsledných metalurgických struktur pomocí měření tvrdosti (makrostruktura) a velikosti a charakteru zrna (mikrostruktura) - viz podkapitola 5.1.1.
- Svaření modelového svarového spoje č. 2 - měření zbytkové napjatosti po svařování magnetoelastickou metodou - viz podkapitola 5.1.2.
- Svaření modelového svarového spoje č. 3 s následným TZ - měření zbytkové napjatosti po TZ magnetoelastickou metodou - viz podkapitola 5.1.2. Kratší výdrž a nižší teplota byla zvolena záměrně z důvodů zachování jisté úrovně zbytk. napjatosti.

5.1.1 Technologický postup svařování a TZ, teplotní cykly, stanovení výsledných metalurgických struktur

Všechny modelové svarové spoje byly provedeny svařením dvou desek v rámu z U profilu pomocí devíti svarových housenek (viz obr. 5.1.1.1) technologií MMAW ($\eta = 0,8$). Základní materiál desek je ocel P355NL1 resp. 11503 a přídatný svarový materiál patří do skupiny E 46 6 1 Ni B 42 H5. Svařovací parametry a parametry TZ (tepelné zpracování ke snížení zbytkových napětí po svařování) jsou uvedeny v tab. 5.1.1.1.

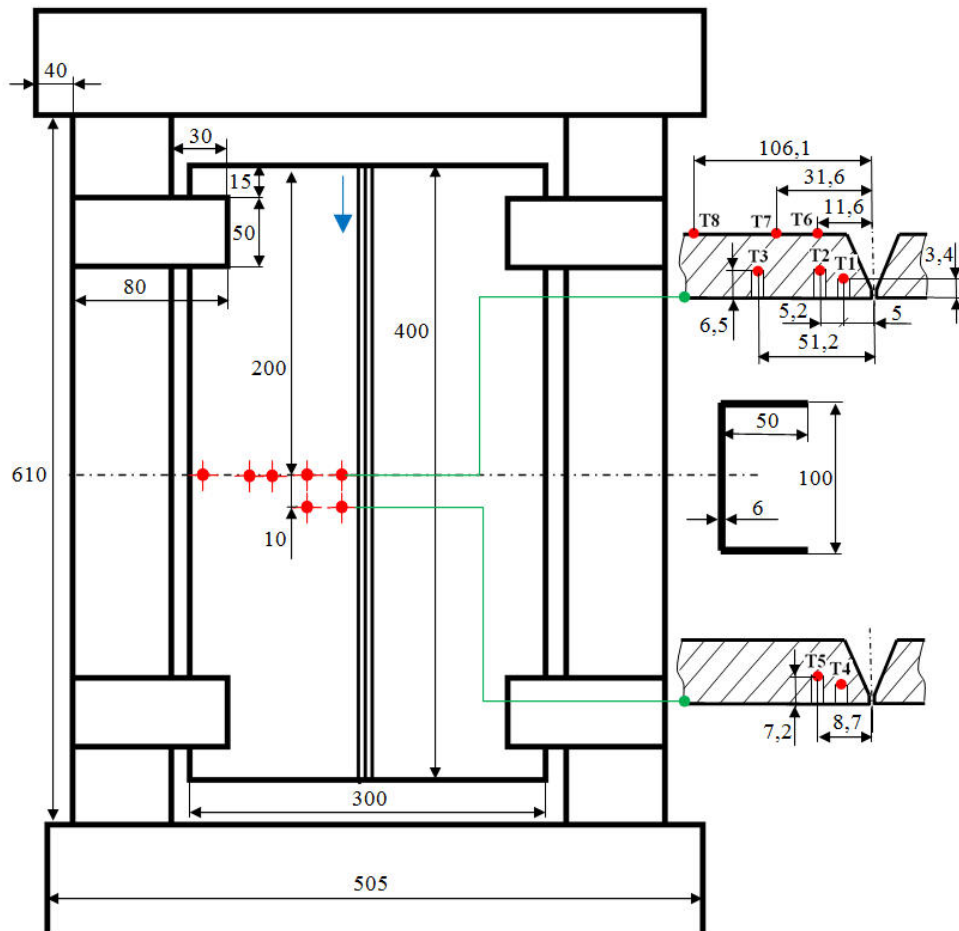
Tab. 5.1.1.1 Parametry svařování a TZ

	Housenka	\varnothing el. [mm]	I [A]	U [V]	v_s [mm/s]	Q_s [J/mm]
Svařování	1	3,2	115	20	1,56	1474
	2	3,2	124	21	1,86	1400
	3	3,2	123	22	4,06	666
	4	3,2	123	22	3,06	884
	5	3,2	124	22	3,72	733
	6	3,2	124	21	4,85	537
	7	3,2	124	21	3,75	694
	8	3,2	124	21	4,02	648
	9	3,2	124	124	21	3,75
TZ	ohřev 200°C/hod.; výdrž 1 hod. na teplotě 560÷580°C; ochlazení 200°C/hod.					

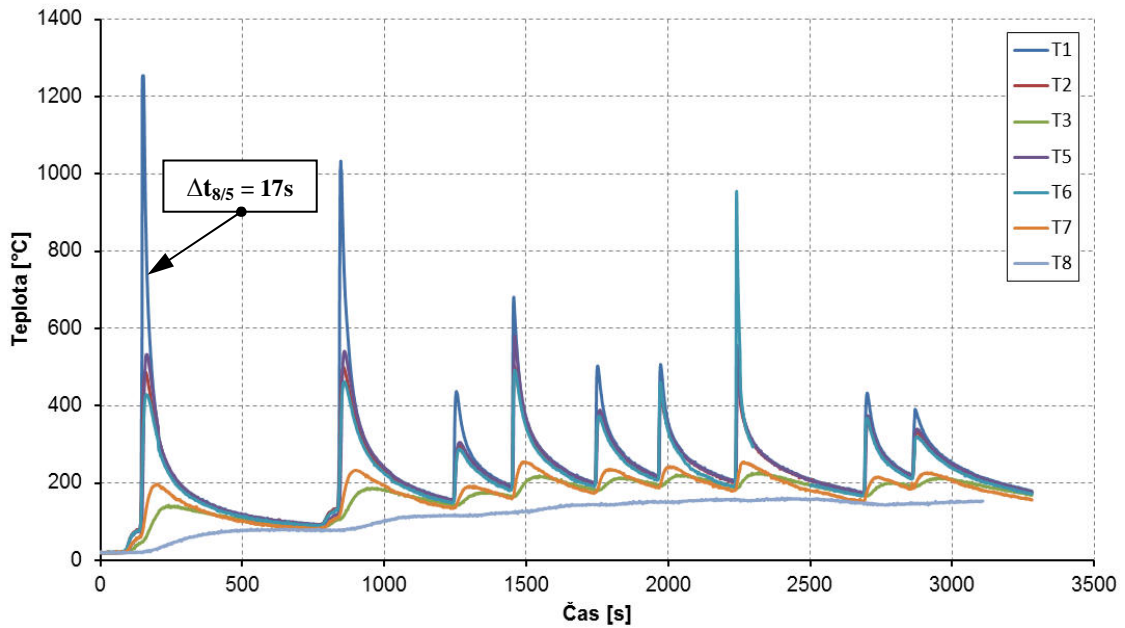


Obr. 5.1.1.1 Schéma experimentu svařování (vlevo), úprava svarových ploch a postup svařování (vpravo)

V průběhu svařování bylo prováděno měření teplotních cyklů (viz **obr. 5.1.1.3**) pomocí termočlánků T1 až T8 rozmístěných na svařovaných deskách dle **obr. 5.1.1.2**. Termočlánek T4 neměřil korektní data, proto není ve vykreslení teplotních cyklů zahrnut.

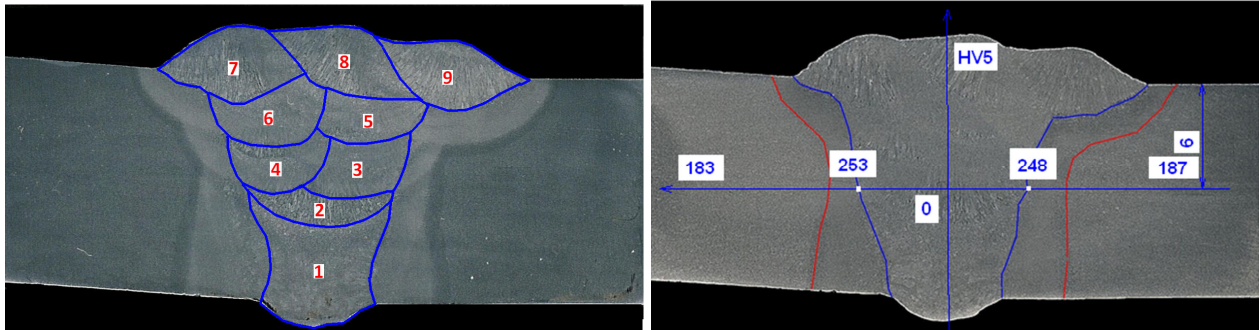


Obr. 5.1.1.2 Rozměry svařence a umístění termočlánků T1 až T8 (pohled A viz obr. 5.1.1.1)

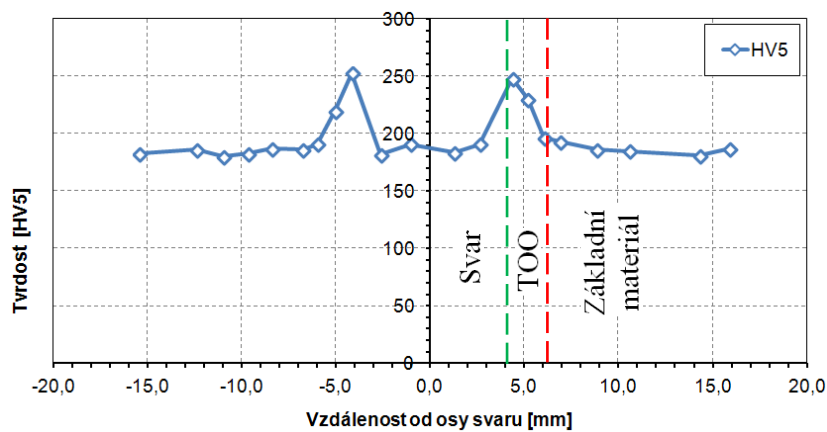


Obr. 5.1.1.3 Záznam měření teplotních cyklů

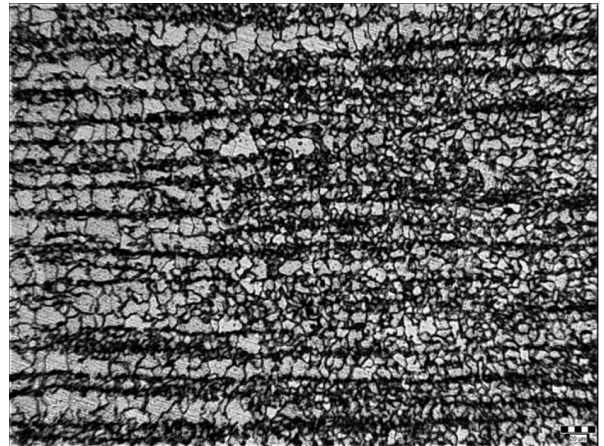
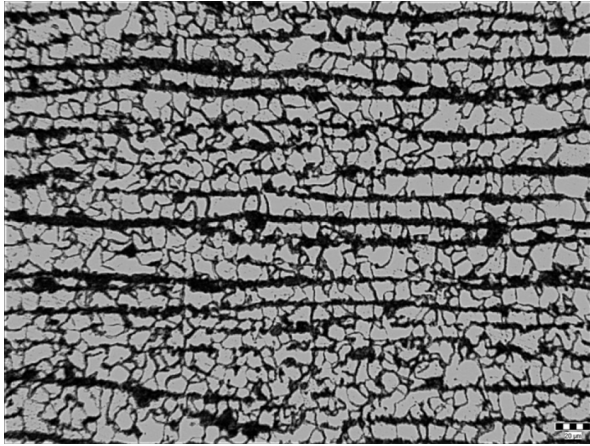
Výsledné metalurgické struktury byly stanoveny na základě měření profilu tvrdosti makrostruktury svarového spoje spolu s detailním metalografickým rozбором mikrostruktury jednotlivých pásem svarového spoje. Makrostruktura s vyznačením oblasti měření tvrdosti je znázorněna na obr. 5.1.1.4 a výsledný profil HV5 je na obr. 5.1.1.5. Mikrostruktura (zvětšeno 200x) je postupně uvedena na obr. 5.1.1.6 až obr. 5.1.1.8.



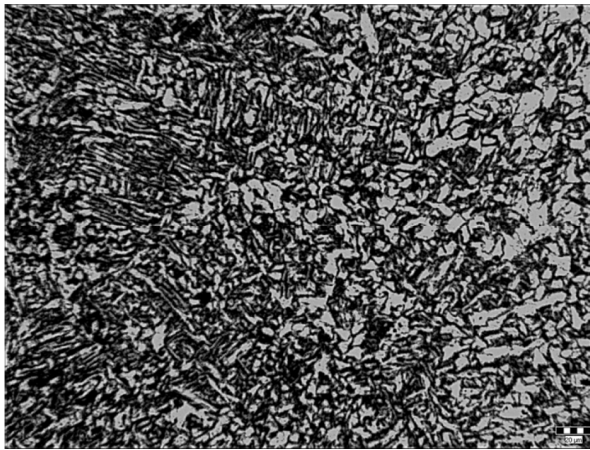
Obr. 5.1.1.4 Makrostruktura svarového spoje + oblast měření tvrdosti ve svaru a TOO



Obr. 5.1.1.5 Výsledný profil tvrdosti



Obr. 5.1.1.6 Základní materiál (vlevo) a základní materiál + Ac_1 (vpravo)



Obr. 5.1.1.7 Pásmo normalizace (TOO) + Ac_3 (vlevo) a pásmo přehřátí (TOO) + pásmo normalizace (vpravo)



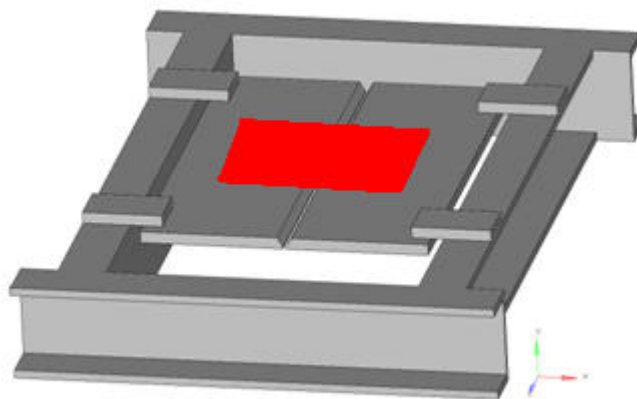
Obr. 5.1.1.8 Pásmo přehřátí (TOO) + svarový kov

Z výsledků experimentálního měření vyplývají následující závěry. Základní materiál má strukturu feriticko-perlitickou (tvrdost cca 185 HV5). Struktura v TOO je feriticko-perlitická, zjemněné zrna v pásmu normalizace, zhrubnuté zrna v pásmu přehřátí. V podhousenkové oblasti je hrubé zrna s výskytem banitické struktury (tvrdost HV_{max} 275 HV5). Svarový kov je feriticko-perlitický s typickou lící strukturou a orientací ve směru odvodu tepla (tvrdost 180 HV5). Metalurgické struktury odpovídají použitému materiálu a technologii svařování (tloušťka materiálu 12mm, MMAW-111). Čas ochlazování v podhousenkové oblasti (viz termočlánek č. 1) dosahuje $\Delta t_{8/5} = 17s$, což odpovídá dosažené struktuře a tvrdosti.

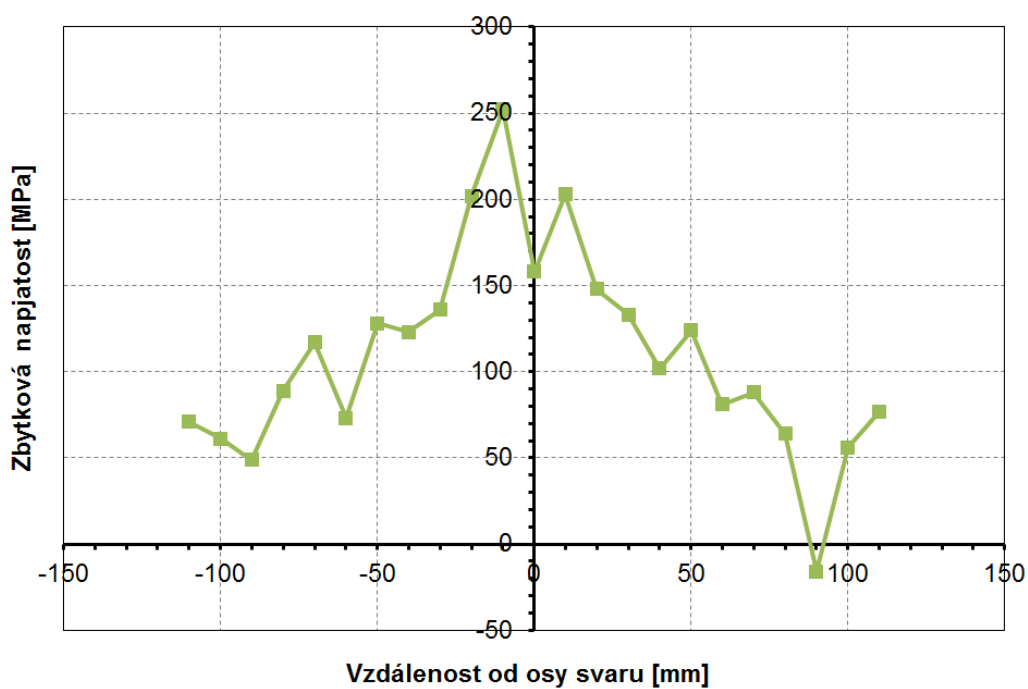
5.1.2 Měření zbytkové napjatosti po svařování a TZ magnetoelastickou metodou

V rámci experimentálního programu bylo jedním z cílů pokusit se stanovit zbytkovou napjatost ve svaru a TOO, aby bylo možné zhodnotit vliv aplikace EVP modelů materiálu vzhledem k reálným podmínkám procesu svařování a TZ. Nejprve byly uvažovány tři možné experimentální metody uvedené v kap. 4.6. Metoda magnetoelastická (VŠB TUO), modifikovaná odvrťovací metoda (zařízení ÚAM Brno, vyhodnocení dr. Švaříček) a metoda neutronové difrakce (ÚJV Řež). Ovšem po zhodnocení možností jednotlivých metod byla použita pouze magnetoelastická z následujících důvodů. Modifikovaná odvrťovací metoda by byla pravděpodobně schopná velice přesně popsat zbytkovou napjatost, především v případě svařování, avšak vzhledem k nutnosti aplikace tenzometrických růžic není možné provést měření právě ve svaru a v TOO, kde by se měl vliv viskoplastických efektů nejvíce projevit. V případě neutronové difrakce bylo vyvinuto úsilí provést měření v ÚJV Řež, které by provedli pracovníci ÚJF AVČR, ovšem vzhledem k vytíženosti experimentálního reaktoru nebylo možné měření zatím realizovat.

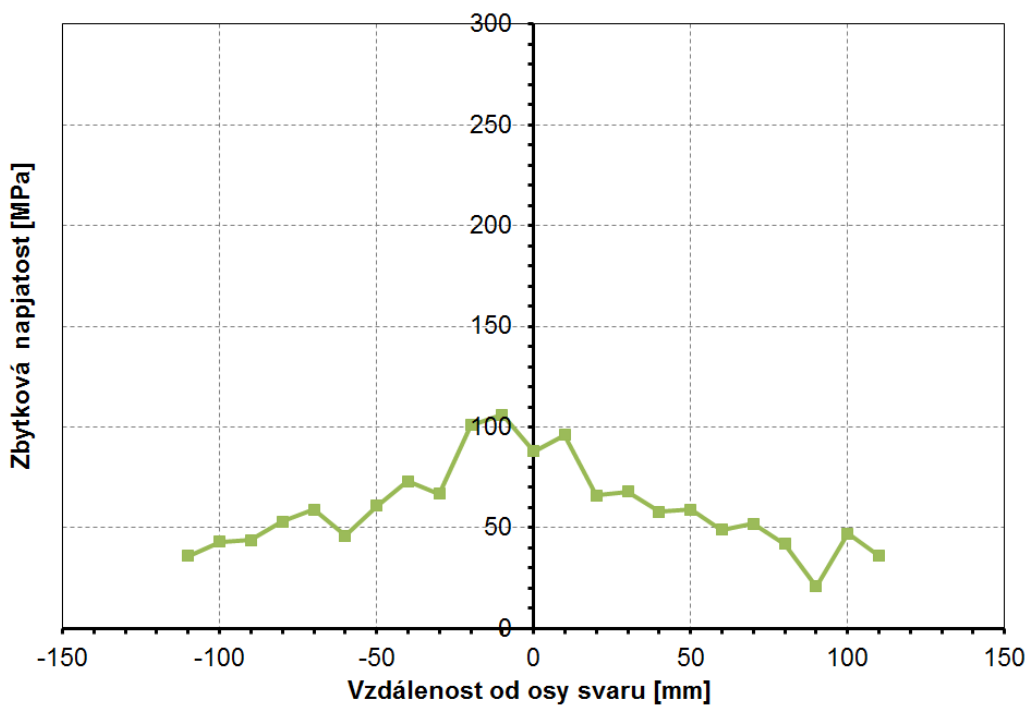
Měření hlavních zbytkových napětí po svařování (viz **obr. 5.1.2.2**) a TZ (viz **obr. 5.1.2.3**) bylo provedeno třikrát v červeně vyznačené oblasti (viz **obr. 5.1.2.1**). Naměřené výsledky (průměrná hodnota ze tří měření) budou v kap. 7.2.4 porovnány s vypočtenou zbytkovou napjatostí.



Obr. 5.1.2.1 Oblast měření zbytkové napjatosti



Obr. 5.1.2.2 Průběh měřené maximální hlavní zbytkové napjatosti po svařování (magnetoelastická metoda - VŠB TUO)

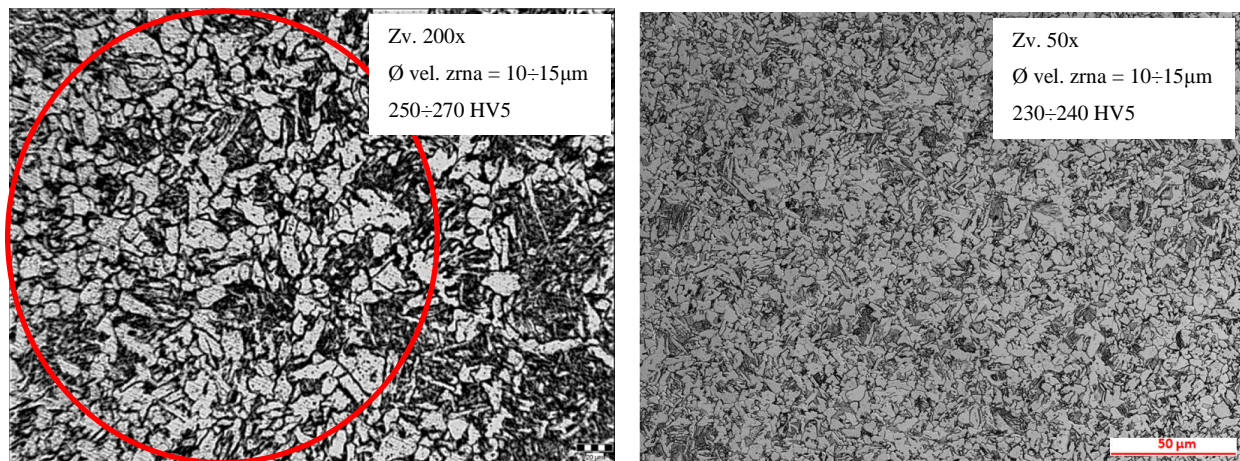


Obr. 5.1.2.3 Průběh měřené maximální hlavní zbytkové napjatosti po TZ (magnetoelastická metoda - VŠB TUO)

5.2 Provedení mechanických zkoušek materiálů modelového svarového spoje

Na základě provedených zkoušek v kap. 5.1 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. Tato zkušební tělesa byla získána vhodným tepelným zpracováním základního feriticko-perlitického materiálu. Vytvořená bainitická struktura byla verifikována pomocí porovnání velikosti a charakteru zrn a měřením tvrdosti (viz. **obr. 5.2.1**) tak, aby co nejvíce odpovídala bainitické struktuře vzniklé v podmínkách svařování.



Obr. 5.2.1 Porovnání bainitické struktury získané v podmínkách svařování (vlevo) s bainitickou strukturou vytvořenou vhodným TZ (vpravo)

Všechny tři sady zkušebních těles (tvar a rozměry dle standardního vzorku pro tahovou zkoušku) byly použity v rámci následujících mechanických zkoušek. Cílem bylo získat EP a EVP vstupní materiálové charakteristiky pro provedení numerických analýz.

- Zkoušky jednoosým tahem
- Relaxační zkoušky
- Creepové zkoušky

Kompletní přehled výsledků z výše zmíněných zkoušek je podrobně prezentován pro standardní EP mechanické vlastnosti v kap. 6.2 a pro nestandardní EVP mechanické vlastnosti v kap. 6.3.

6 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

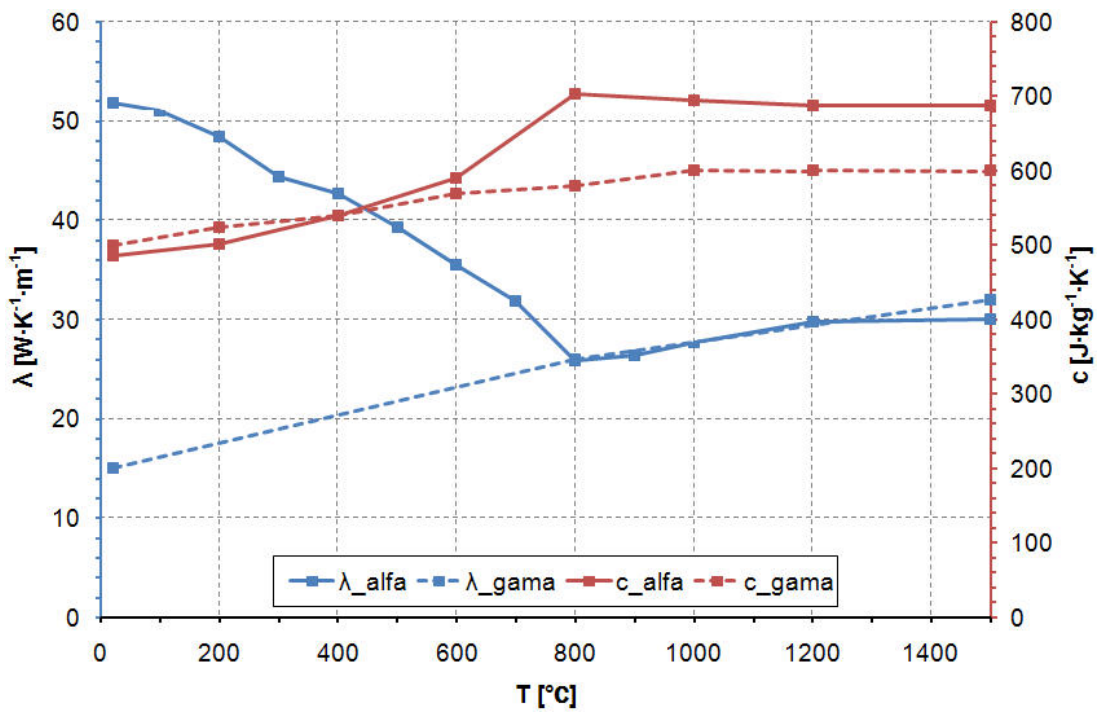
V této kapitole jsou uvedeny materiálové charakteristiky všech metalurgických struktur (navržených v kap. 5) materiálů P355NL1 resp. 11503 (základní materiál - ZM) a E 46 6 1 Ni B 42 H5 (svarový materiál - SM), potřebné pro provedení testovacích a verifikačních EP a EVP numerických analýz. Chemické složení jednotlivých materiálů je dle **tab. 6.1** [40, 41]. Termofyzikální vlastnosti byly získány na základě literatury [42, 43, 44]. Konkrétní EP a EVP mechanické vlastnosti byly získány na základě experimentálního programu navrženého na ÚAM Brno (viz kap. 5) a provedeného ve spolupráci s ÚFM AVČR. Jednotlivé podkapitoly dokumentují přehled materiálových charakteristik, výsledků experimentálních měření a postupů transformace „surových“ experimentálních dat na vstupní výpočtové EVP parametry.

Tab. 6.1 Chemické složení materiálu P355NL1 a E 46 6 1 Ni B 42 H5

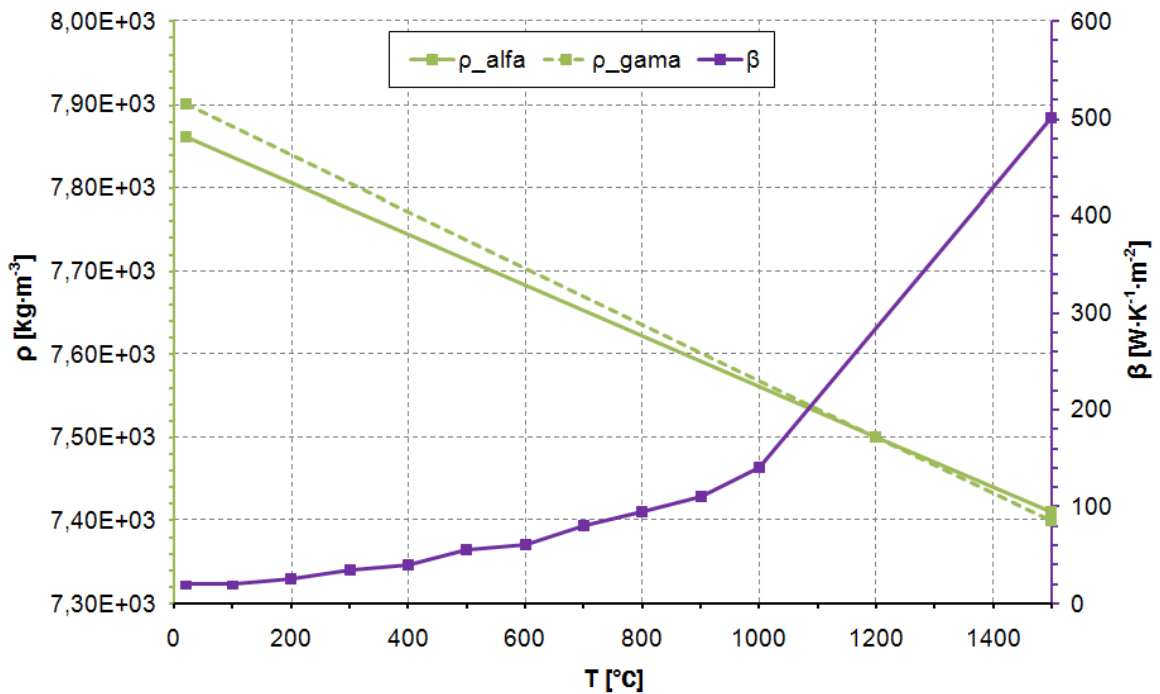
Ocel	Prvek [%]											
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	N	Si	P	S	Cu	Nb	Ti
P355NL1	0,14	0,06	0,17	0,01	1,39	0,0035	0,31	0,009	0,001	0,16	0,017	0,018
E4661NiB 42H5	0,053	0,02	0,90	0,002	1,32	-	0,42	0,006	0,007	0,02	0,004	-

6.1 Termofyzikální vlastnosti materiálu P355NL1 a E 46 6 1 Ni B 42 H5

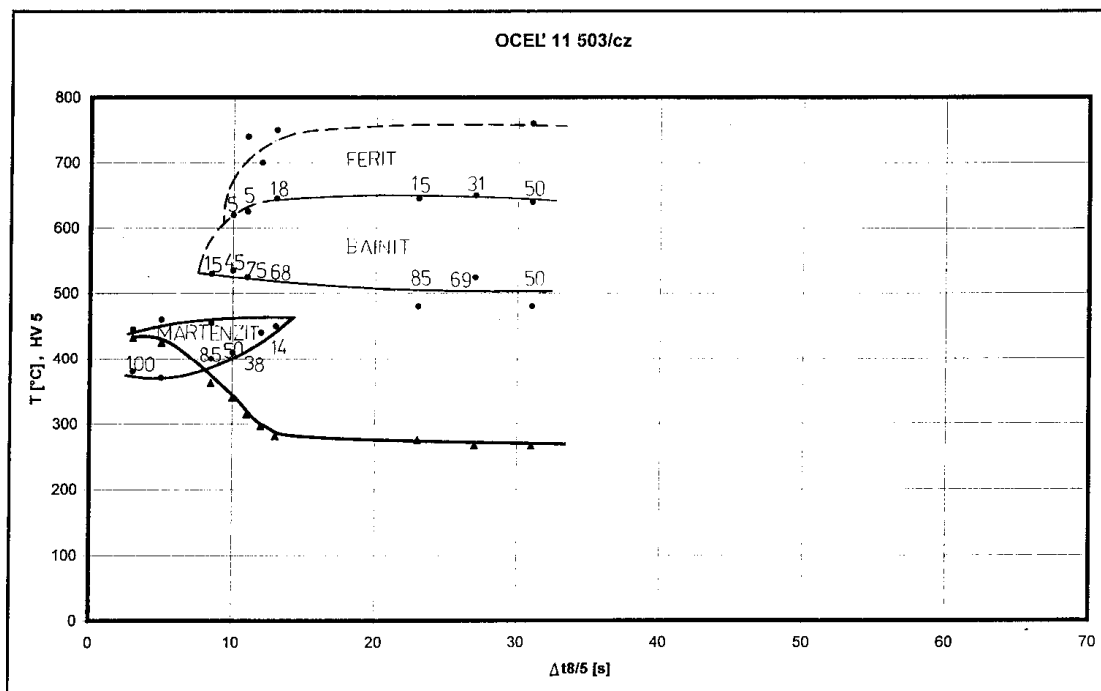
Na **obr. 6.1.1** jsou uvedeny průběhy tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě a metalurgické struktuře. Metalurgickými strukturami jsou α (ferit+perlit, bainit a martenzit) a γ (austenit) fáze ZM a SM. **Obr. 6.1.2** reprezentuje průběh hustoty materiálu v závislosti na teplotě a metalurgické struktuře spolu s teplotní závislostí koeficientu přestupu tepla uvažovaného pro rozhraní ocel-vzduch. Diagram anizotermického rozpadu austenitu základního materiálu měřený přímo v podmínkách svařování je uveden na **obr. 6.1.3**. ARA diagram svarového materiálu je na **obr. 6.1.4**.



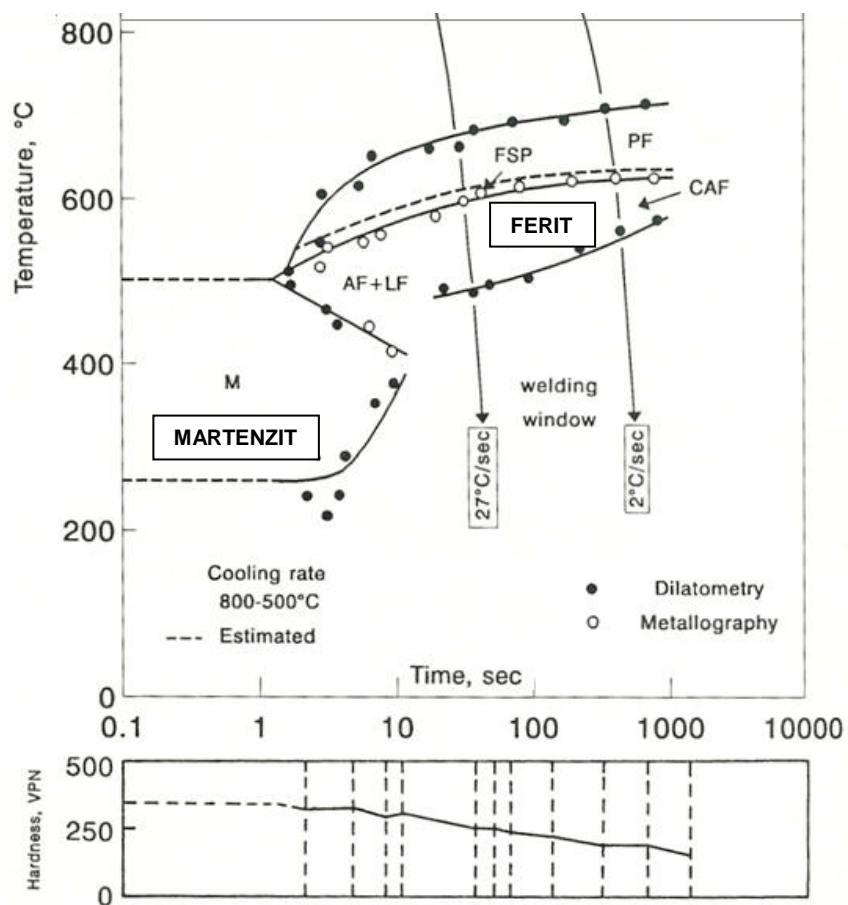
Obr. 6.1.1 Koeficient tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity



Obr. 6.1.2 Hustota a koeficient přestupu tepla pro rozhraní ocel-vzduch



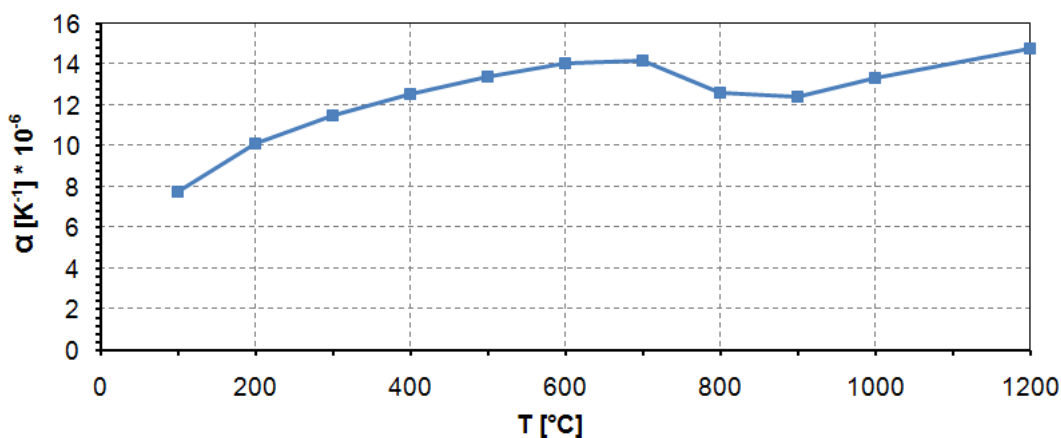
Obr. 6.1.3 ARA diagram ZM v podmínkách svařování



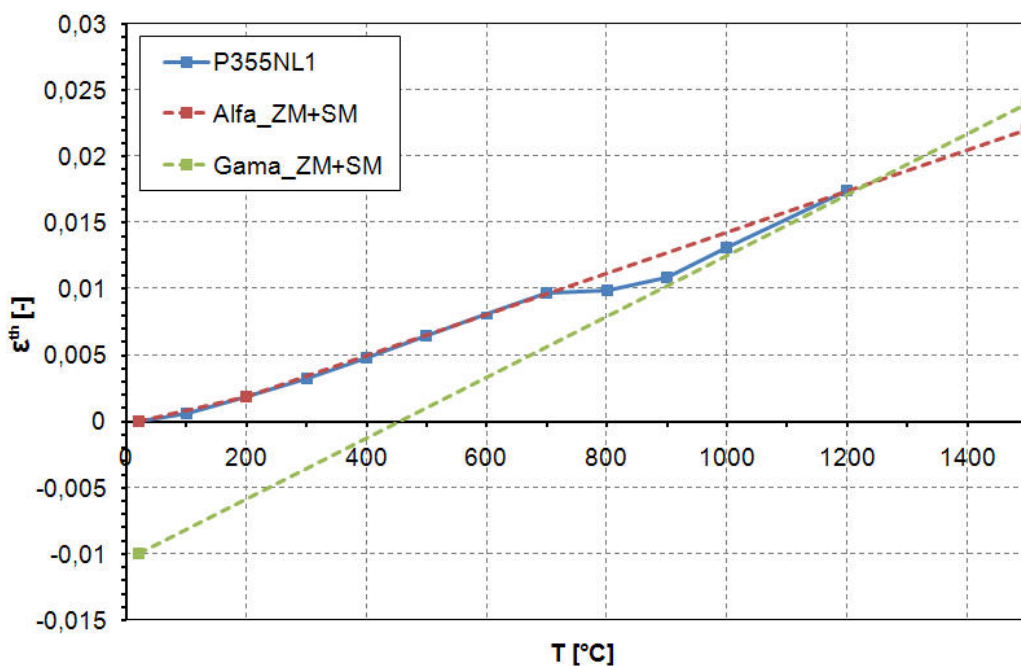
Obr. 6.1.4 ARA diagram SM

6.2 EP mechanické vlastnosti materiálu P355NL1 a E4651NiB32H5

Teplotní roztažnost **obr. 6.2.1**, resp. teplotní přetvoření **obr. 6.2.2** α (ferit+perlit, bainit a martenzit) a γ (austenit) fáze ZM a SM, byla získána na základě [42]. Poissonovo číslo bylo uvažováno $\mu = 0,3$ v celém teplotním rozsahu. Na **obr. 6.2.3** až **obr. 6.2.8** jsou postupně znázorněny výsledky měření modulu pružnosti, meze kluzu a deformačního zpevnění ZM a SM v závislosti na teplotě a metalurgické struktuře. Hodnoty deformačního zpevnění jsou přepočteny ze smluvních na skutečné pro přímé zadání do MKP. Měření bylo prováděno v teplotním rozsahu $20 \div 800^\circ\text{C}$ (při této teplotě je již určité zastoupení γ fáze) s tím, že do teploty 1500°C byla provedena extrapolace k nule na základě [45]. Maximální teplota měření 800°C byla limitována především vlastnostmi materiálu a dále možnostmi měřicí techniky. Mechanické vlastnosti γ fáze ZM a SM, zejména pro nižší teploty, jsou převzaty z [45] jako hodnoty pro obecnou uhlíkovou ocel.

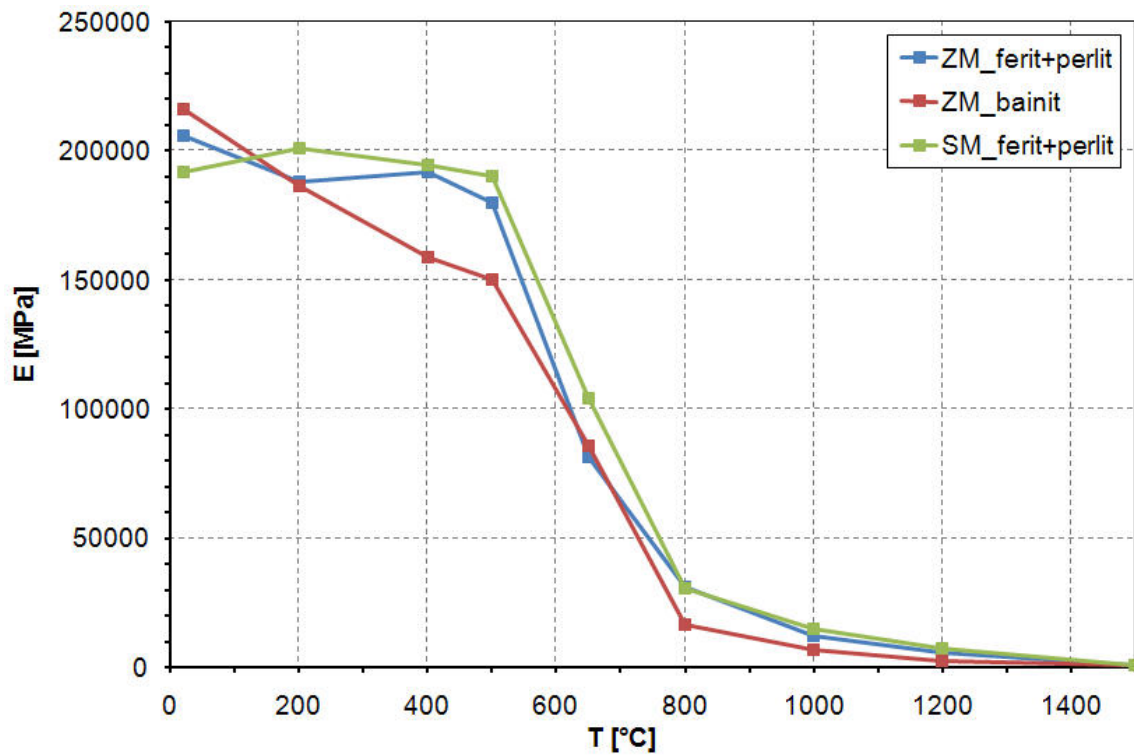


Obr. 6.2.1 Teplotní roztažnost P355NL1

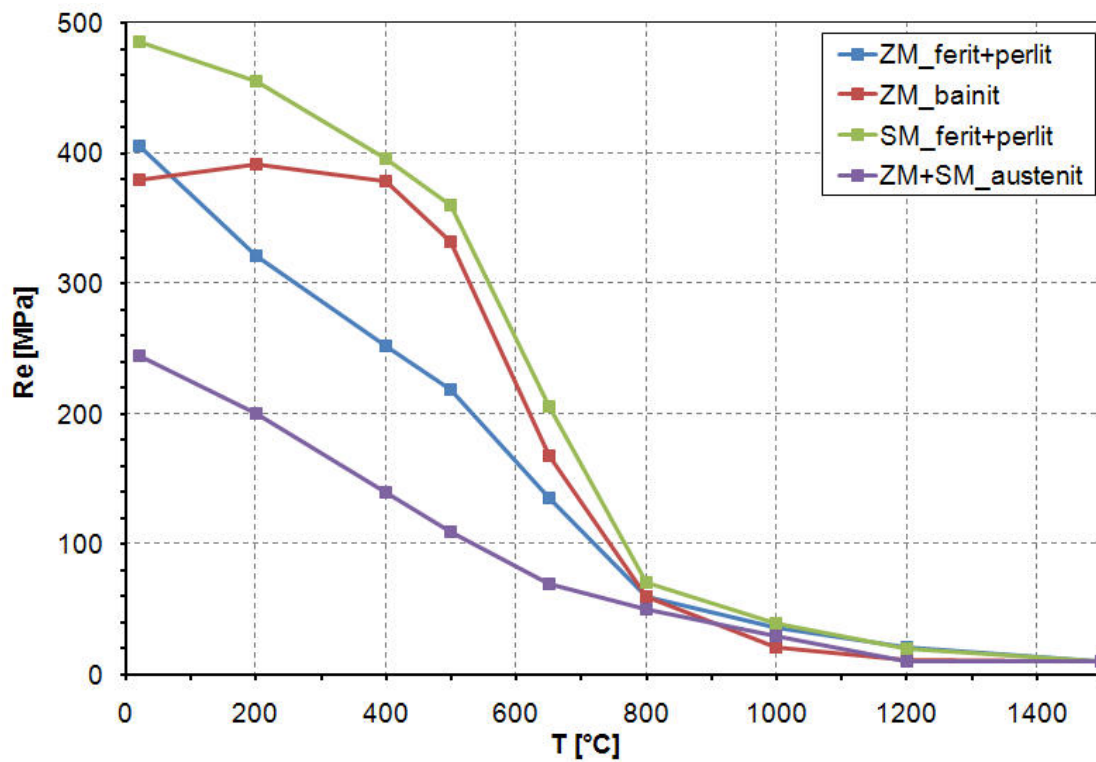


Obr. 6.2.2

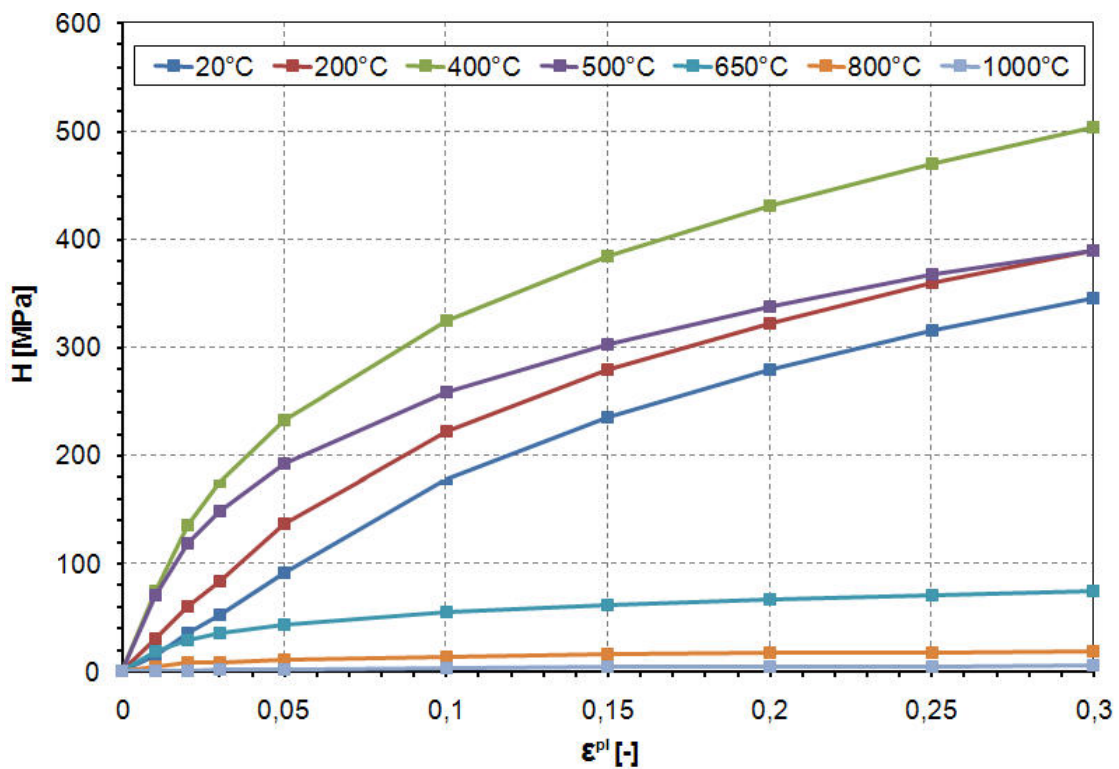
Teplotní přetvoření stanovené na základě výše uvedené teplotní roztažnosti



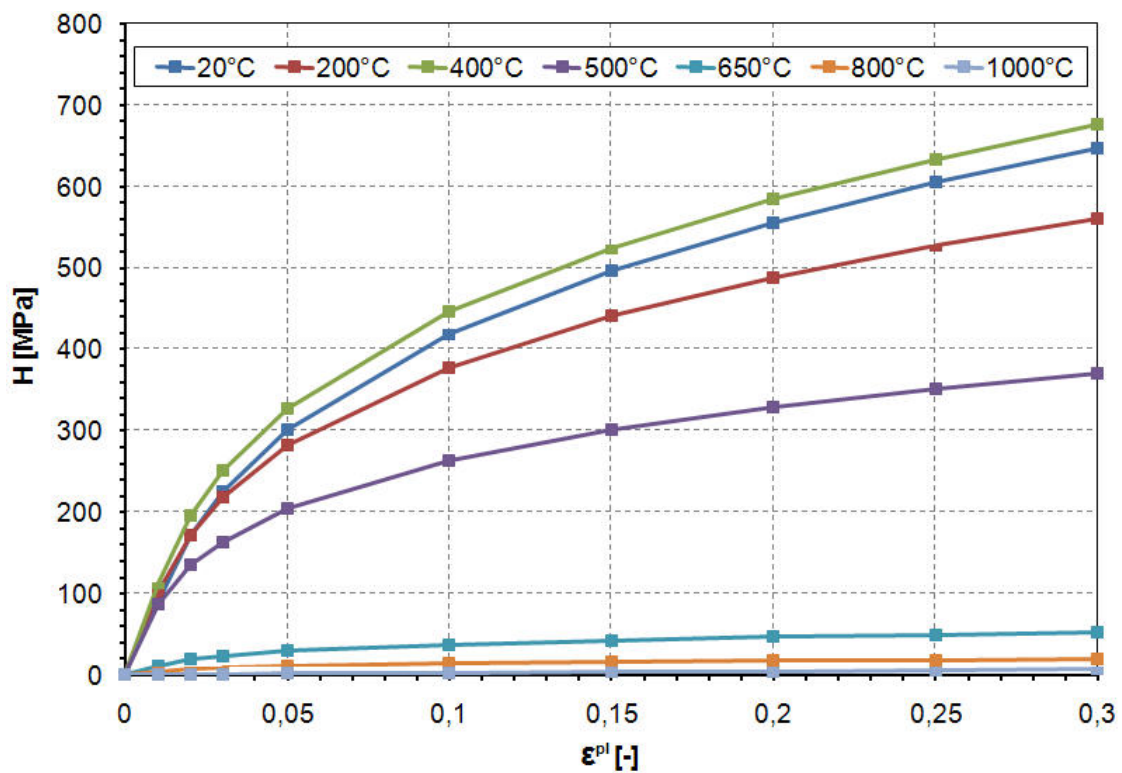
Obr. 6.2.3 Modul pružnosti



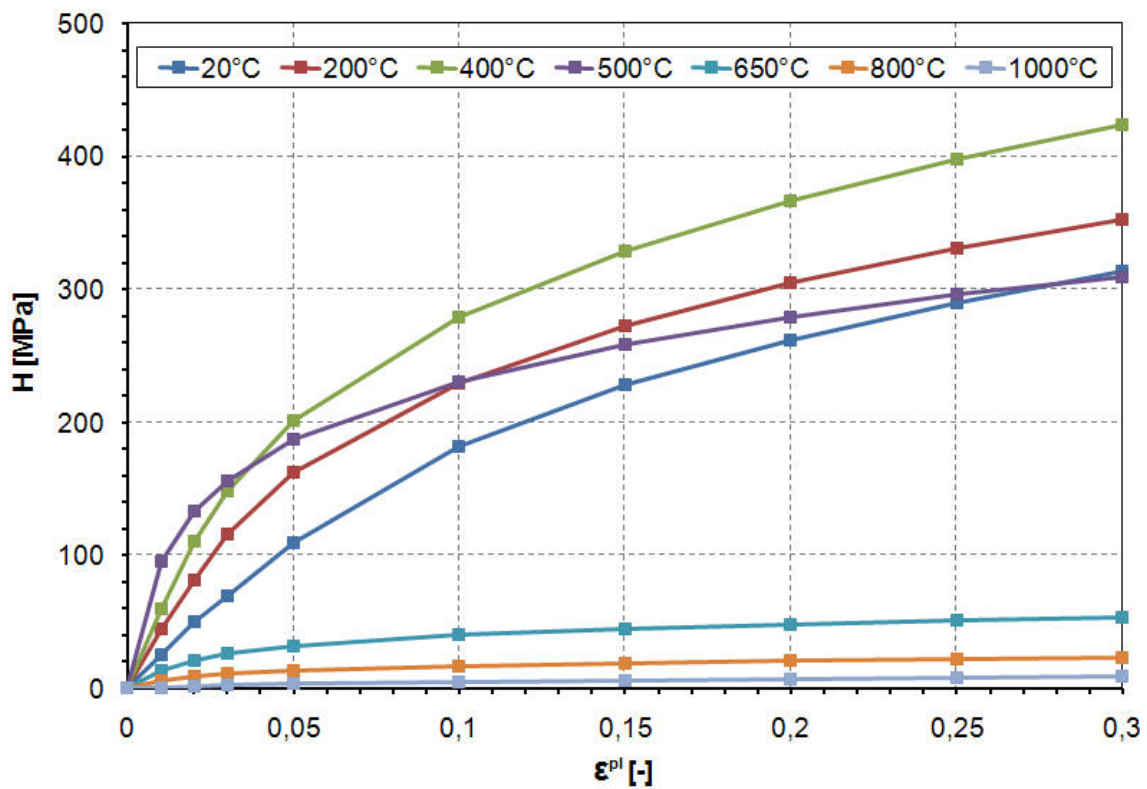
Obr. 6.2.4 Mez kluzu



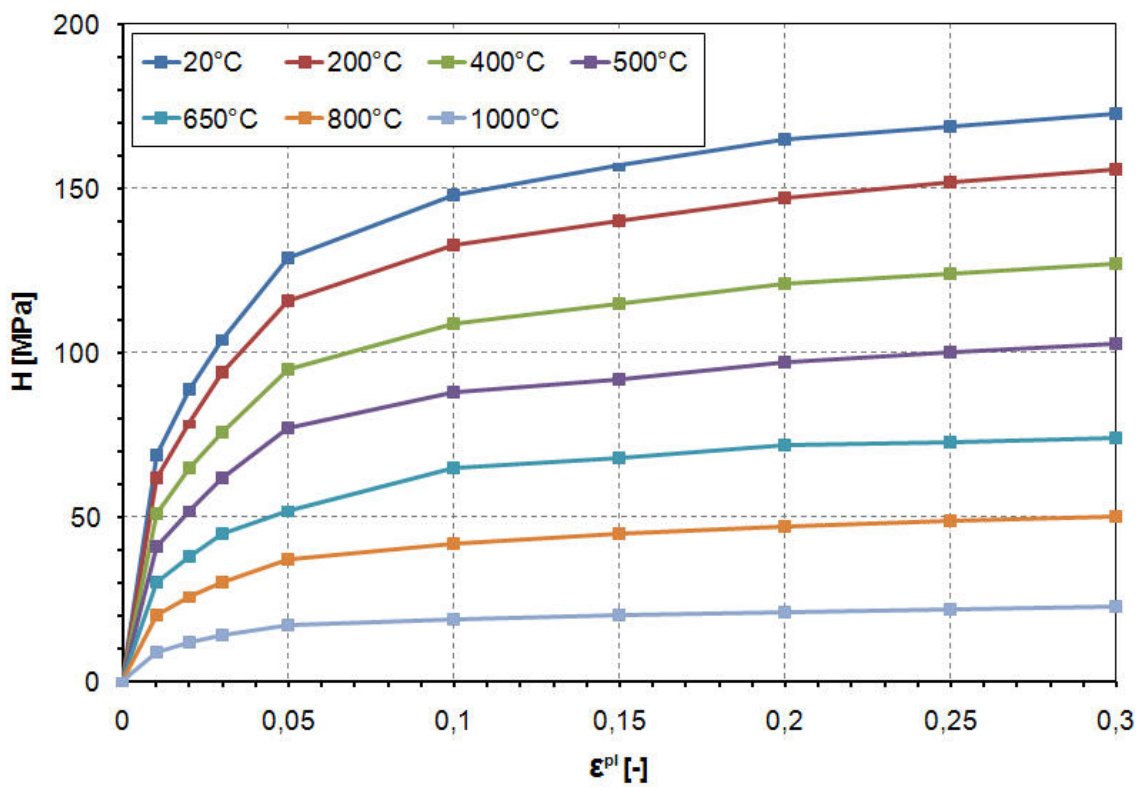
Obr. 6.2.5 Deformační zpevnění ZM_ferit+perlit



Obr. 6.2.6 Deformační zpevnění ZM_bainit



Obr. 6.2.7 Deformační zpevnění SM_ferit+perlit



Obr. 6.2.8 Deformační zpevnění ZM+SM_austenit

6.3 EVP mechanické vlastnosti materiálu P355NL1 a E 46 6 1 Ni B 42 H5

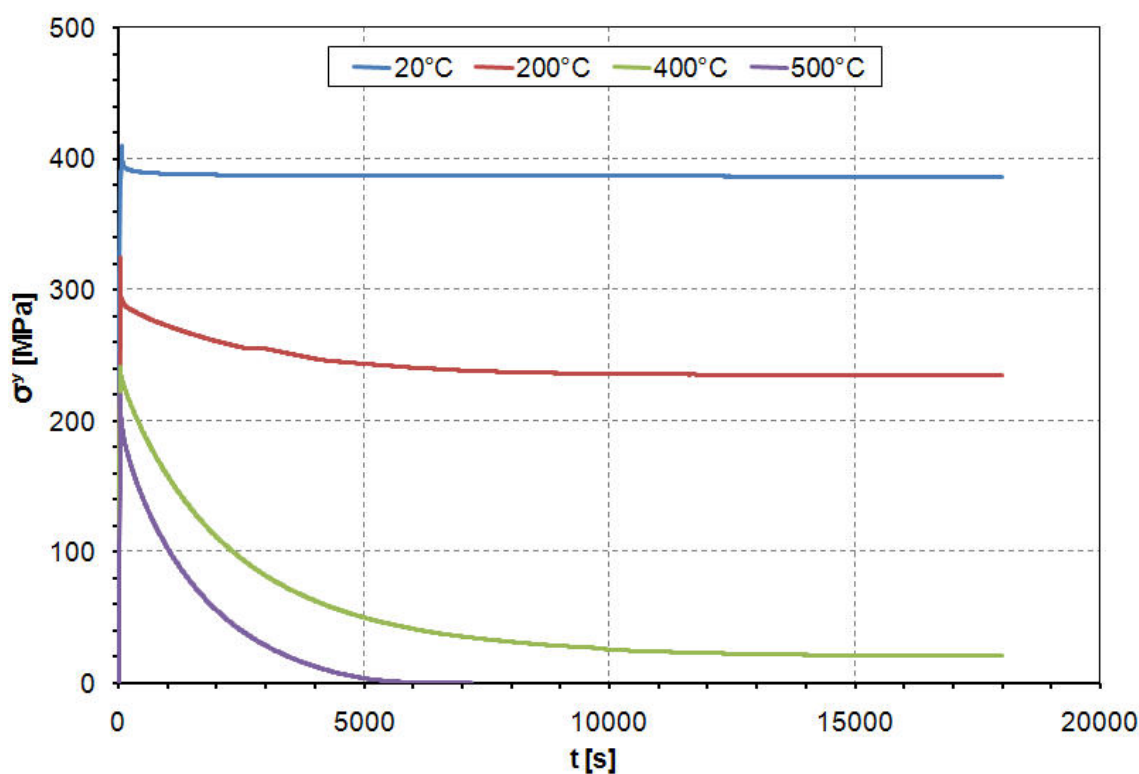
Podkap. 6.3.1 a 6.3.2 obsahuje výsledky relaxačních a creepových zkoušek. Z hlediska metalurgické struktury byly použity stejné zkušební vzorky jako v případě měření EP mechanických vlastností. Postup stanovení a verifikace viskoplastických parametrů ze „surových“ experimentálních výsledků pro jednotlivé EVP modely materiálu je uveden v podkap. 6.3.3 a přehled finálních viskoplastických parametrů je v podkap. 6.3.4.

6.3.1 Výsledky relaxačních zkoušek

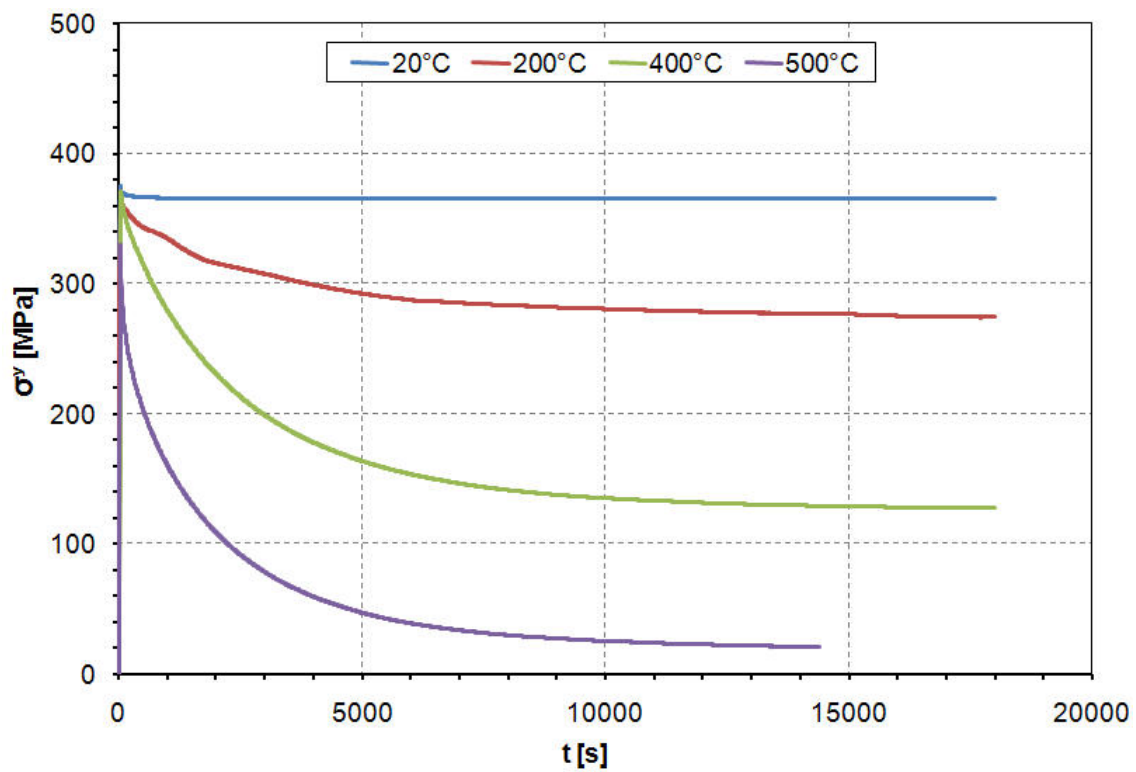
V **tab. 6.3.1.1** jsou hodnoty teplot, při kterých byly prováděny relaxační zkoušky materiálů. Na **obr. 6.3.1.1** až **obr. 6.3.1.3** jsou uvedeny průběhy poklesu napětí z aktuální hodnoty meze kluzu materiálu vlivem relaxace napětí. Relaxační zkoušky byly prováděny v časovém intervalu 5 - 10 hodin. Ustálené hodnoty σ^y bylo dosaženo přibližně po 5 hodinách zkoušky.

Tab. 6.3.1.1 Teplotní rozsah relaxačních zkoušek

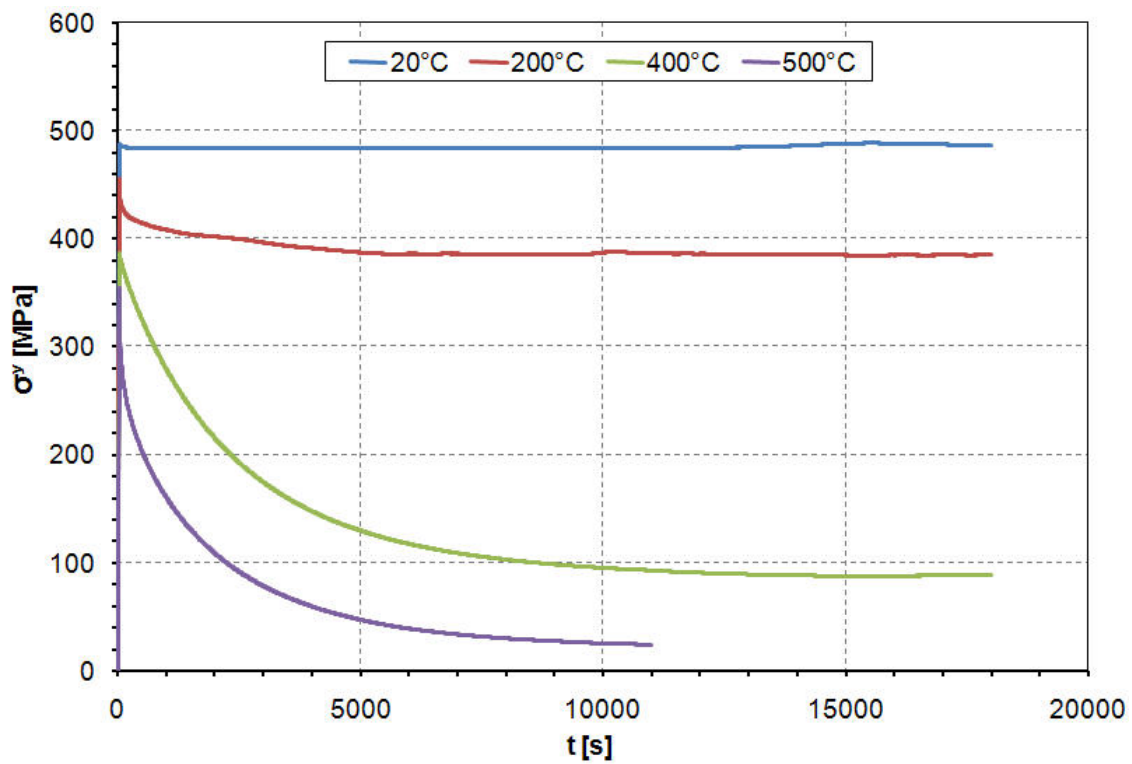
Materiál	P355NL1	E 46 6 1 Ni B 42 H5
Teplota [°C]	20	20
	200	200
	400	400
	500	500



Obr. 6.3.1.1 Relaxační napětí ("viskoplastická mez kluzu") ZM_ferit+perlit



Obr. 6.3.1.2 Relaxační napětí ("viskoplastická mez kluzu") ZM_bainit



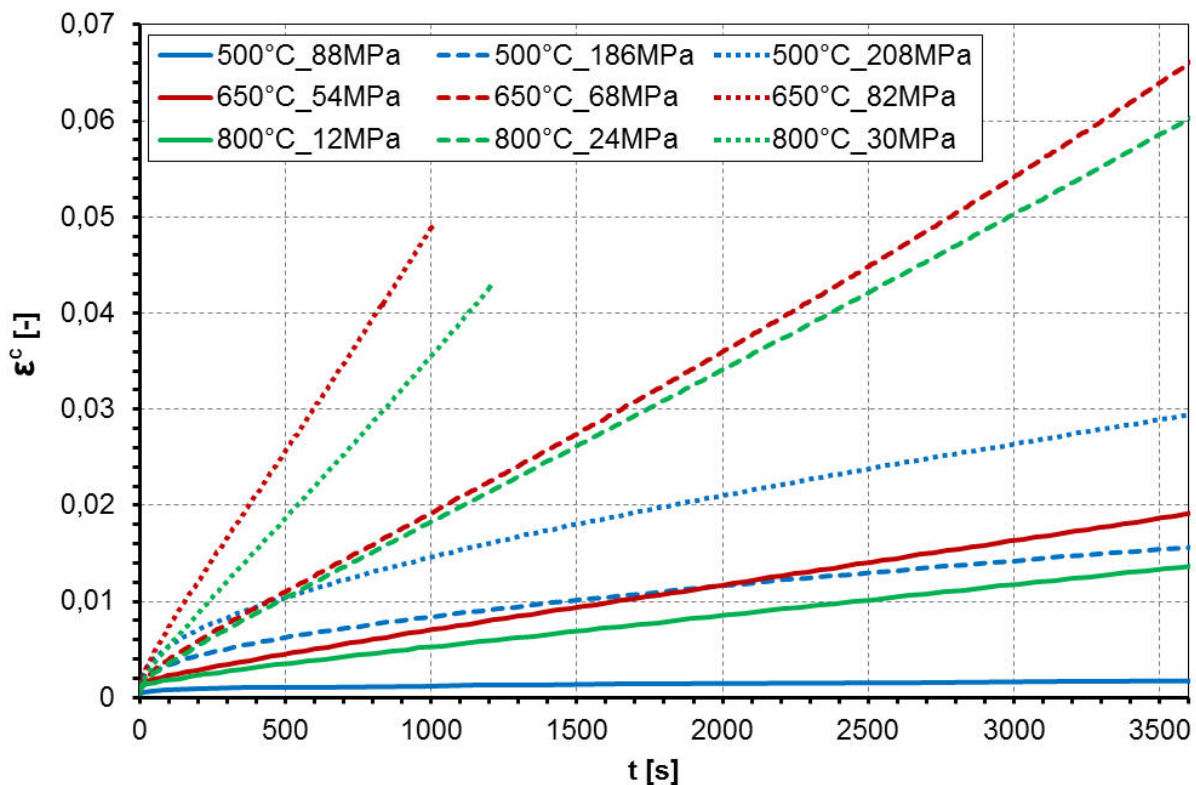
Obr. 6.3.1.3 Relaxační napětí ("viskoplastická mez kluzu") SM_ferit+perlit

6.3.2 Výsledky creepových zkoušek

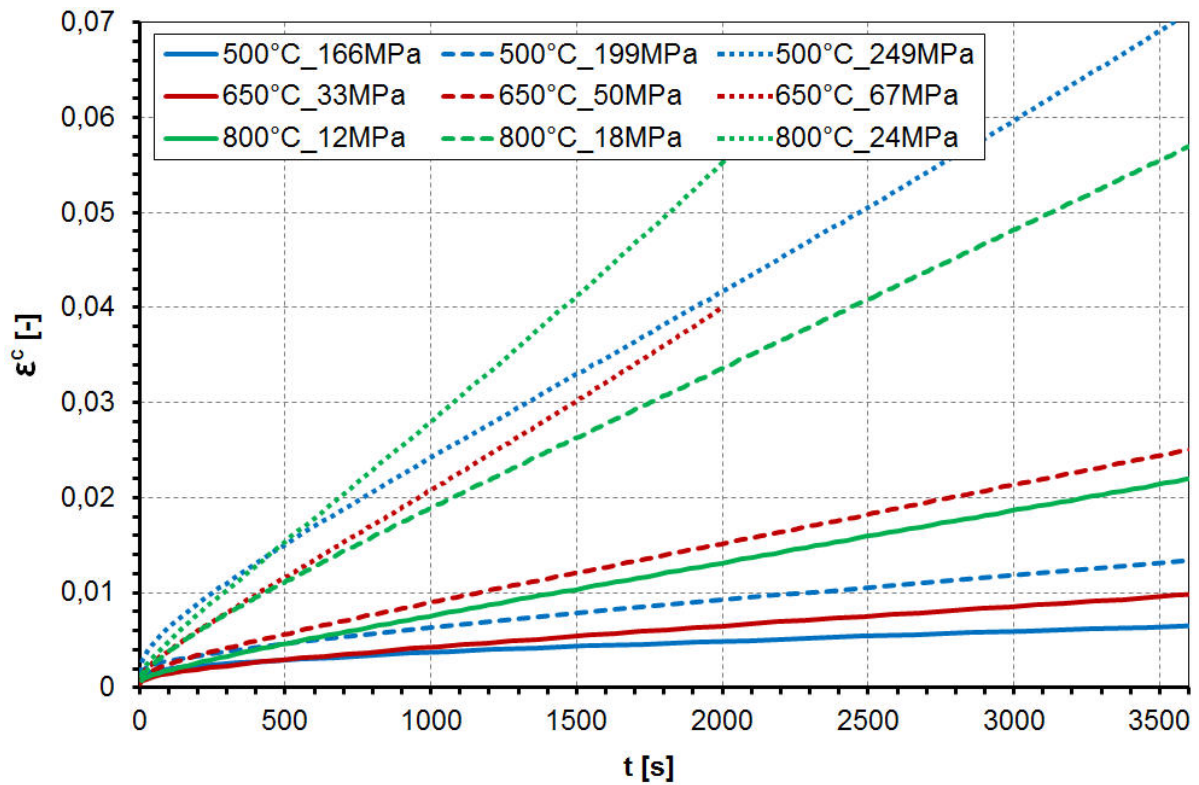
V **tab. 6.3.2.1** jsou hodnoty teplot, při kterých byly prováděny creepové zkoušky materiálů. Na **obr. 6.3.2.1** až **obr. 6.3.2.3** jsou uvedeny průběhy nárůstu celkového přetvoření, respektive přetvoření viskoplastického (dominantní část přetvoření v průběhu celé zkoušky), v závislosti na čase zkoušky pro dané zatížení. Creepové zkoušky byly prováděny v časovém intervalu 5 - 10 hodin. Oblasti s výskytem primárního a začátkem sekundárního creepu bylo dosaženo v časovém intervalu přibližně 1 - 2 hodin.

Tab. 6.3.2.1 Teplotní rozsah creepových zkoušek

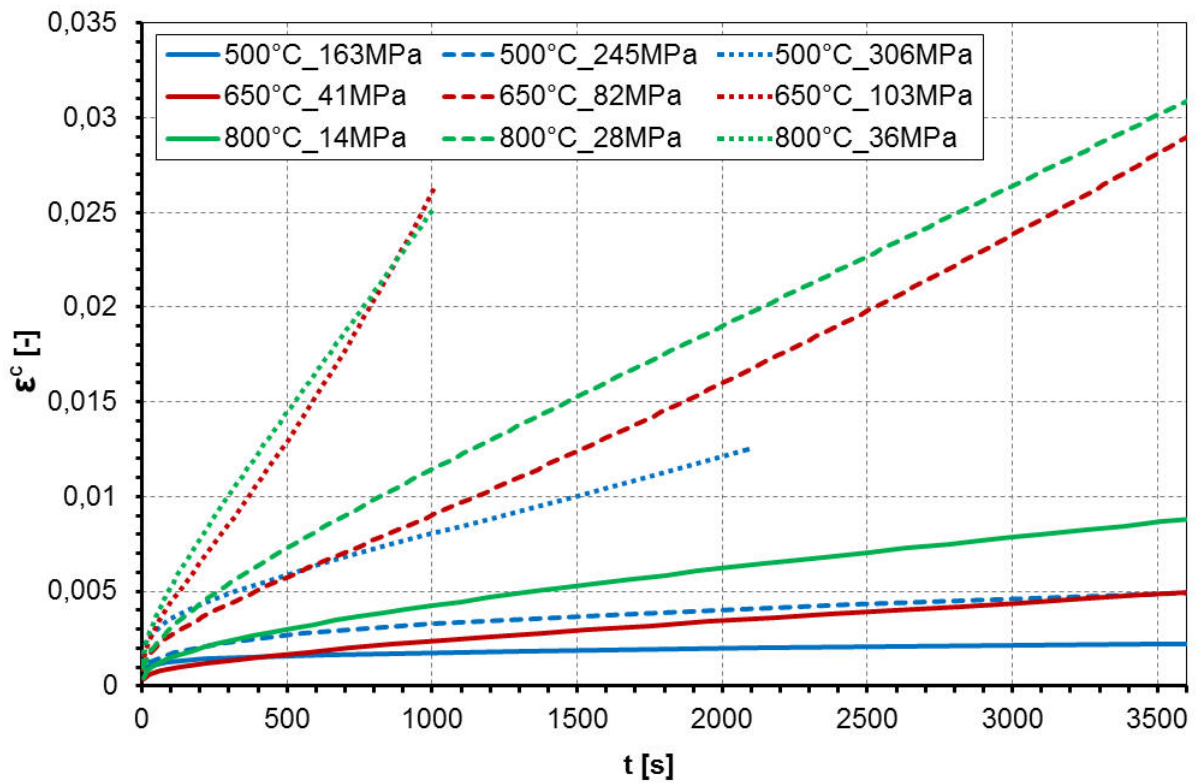
Materiál	P355NL1	E 46 6 1 Ni B 42 H5
Teplota [°C]	500	500
	650	650
	800	800



Obr. 6.3.2.1 Celkové přetvoření v závislosti na teplotě a zatížení pro ZM_ferit+perlit



Obr. 6.3.2.2 Celkové přetvoření v závislosti na teplotě a zatížení pro ZM_bainit



Obr. 6.3.2.3 Celkové přetvoření v závislosti na teplotě a zatížení pro SM_ferit+perlit

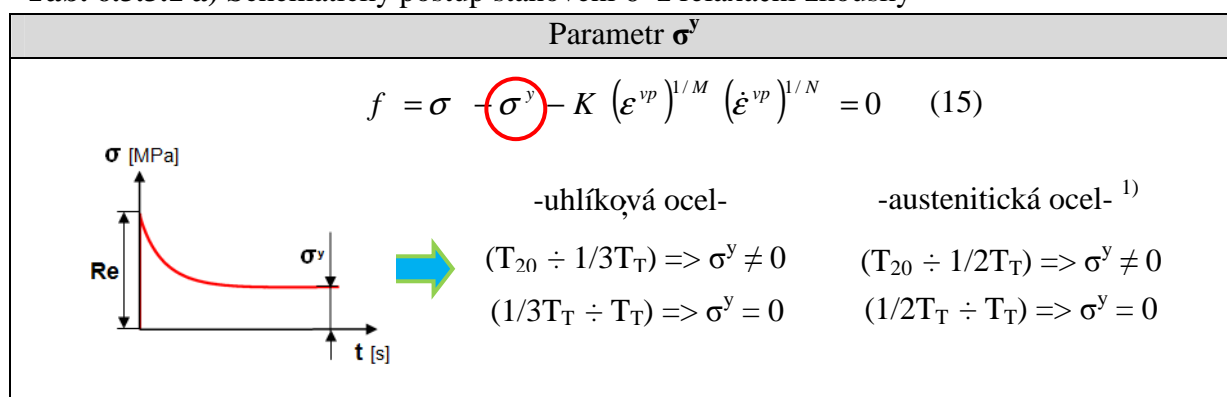
6.3.3 Postup stanovení viskoplastických parametrů

Postup transformace experimentálních dat na výpočtové viskoplastické parametry je schem. uveden pro model č. 21 v **tab. 6.3.3.1** [2, 34, 35] a pro model č. 31 v **tab. 6.3.3.2** [36].

K parametru σ^y (viz **tab. 6.3.3.1 a**)) je třeba poznamenat, že v žádné literatuře, ani v [30], není uvedeno, co přesně tento parametr fyzikálně reprezentuje. Bez jeho definice není možné EVP model materiálu č. 21 aplikovat v numerické analýze. Literatura [34] uvádí pouze skutečnost, že lze parametr σ^y získat obecně z relaxační zkoušky. Proto byl na ÚAM Brno navržen postup měření a konkrétní fyzikální význam parametru σ^y (viz rovnice (15), což je vlastně rovnice (12) upravená do tvaru jednodimenzionálního viskopl. chování materiálu). Lze ho chápat jako ustálenou hodnotu napětí, na kterou toto napětí poklesne z hodnoty konvenční meze kluzu v průběhu relaxačního testu. Relaxační zkoušky se provádí pro teplotní rozsah od pokojové teploty do teploty, kdy σ^y klesne téměř nebo zcela k nulovým hodnotám.

Parametry K, M, N lze získat z další části rovnice (15) v následujících krocích **tab. 6.3.3.1 b**). V bodě 1 je nejprve provedeno měření (pro jednu teplotu) min. tří jednoosých creepových zkoušek pro různá zatížení. Aby bylo možné obdržet parametry K, M, N z jednoosé creepové zkoušky, je dále použita rovnice (9) reprezentující jednodimenzionální viskoplastické chování materiálu. Rovnice (9) je explicitně integrována do tvaru (10) v bodě 2. Po úpravách rovnice (10) a zavedení substituce X (rovnice (16)) a Y (rovnice (17)) se získají v bodě 3 dvě rovnice o dvou neznámých. Postup nalezení koeficientů X a Y je uveden v bodě 4. Koeficient X (18) je roven průměrné hodnotě směrnic přímk z grafu závislosti \ln přetvoření versus \ln času. Koeficient Y (19) je roven přímo směrnici přímky v grafu závislosti \ln zatížení versus \ln podílu přetvoření a času. Po zpětném dosazení koeficientů X a Y do rovnic v bodě 3 se získá odhad hodnot parametrů M a N. Odhad parametru K se obdrží dosazením M a N do rovnice (20) v bodě 5. Odhad parametrů je získán pomocí programu vyvinutého na UAM Brno. Dále musí být parametry zpřesněny a verifikovány ztotožněním experimentálních creepových (bod 6) a tahových (bod 7) křivek s křivkami získanými z numerické simulace creepové a tahové zkoušky. Extrapolace, respektive nalezení hodnot parametrů K, M, N pro teploty mimo teplotní rozsah creepových zkoušek, se provádí ztotožněním experimentální a výpočtové křivky pouze tahové zkoušky.

Tab. 6.3.3.1 a) Schematický postup stanovení σ^y z relaxační zkoušky



1) Odvozeno na základě zkušeností z kap. 7.3

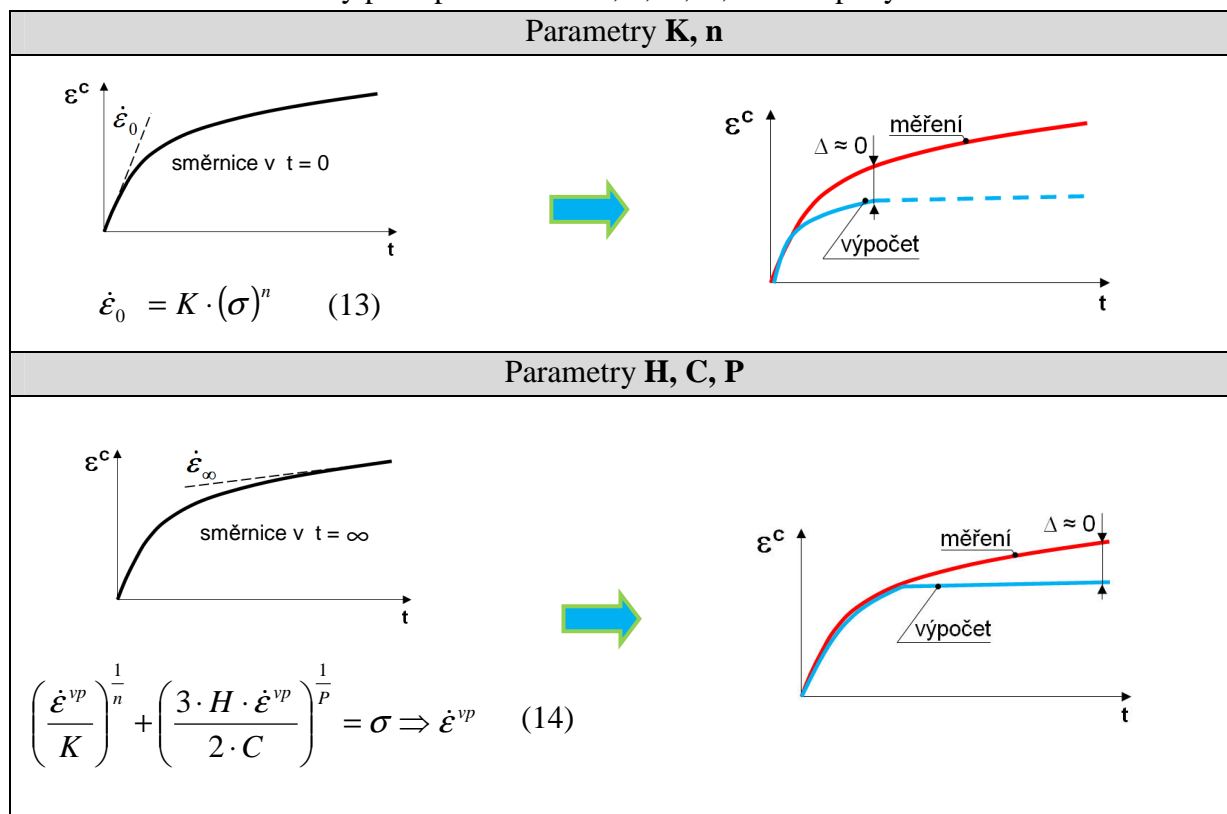
Tab. 6.3.3.1 b) Schematický postup stanovení K, M, N z creepových zkoušek

Parametry K, M, N	
	$f = \sigma - \sigma^y - K (\varepsilon^{vp})^{1/M} (\dot{\varepsilon}^{vp})^{1/N} = 0 \quad (15)$
1	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 20px;"> $\sigma = K \cdot (\varepsilon^{vp})^{1/M} \cdot (\dot{\varepsilon}^{vp})^{1/N} \quad (9)$ </div>
2	$\varepsilon^{vp} = \left[\frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{N+M}} \quad (10)$
3	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> $X \frac{\Delta \ln(\varepsilon^{vp})}{\Delta \ln(t)} = \frac{M}{N+M} \quad (16)$ </div> <div style="text-align: center;"> $Y \frac{\Delta \ln(\sigma)}{\Delta \ln \left[\frac{\varepsilon^{vp}}{t^{N+M}} \right]} = \frac{M+N}{MN} \quad (17)$ </div> </div>
4	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div>
	$X = (k_A + k_B + k_C) / 3 \quad (18) \qquad Y = k \quad (19)$
5	$K = \text{Exp} \left[\frac{1}{N} \ln \left(\frac{M+N}{M} \right) + \ln \sigma + \frac{1}{N} \ln(t) - \frac{N+M}{MN} \ln(\varepsilon^{vp}) \right] \quad (20)$
6	<p style="text-align: center;">(1/3T_T ÷ 2/3T_T)</p>
7	<p style="text-align: center;">(T₂₀ ÷ T_T)</p>

Viskoplastické parametry jsou pro výpočet formálně rozděleny podle metalurgických struktur na α a γ fázi ZM a SM stejně jako v případě EP přístupu. Parametr σ^y může obecně nabývat nenulových i nulových hodnot pro α fázi a pouze nulových hodnot pro γ fáze. Creepové zkoušky, ze kterých se získají parametry K, M, N, se prováděly v teplotním rozsahu 500°C ÷ 800°C. To znamená, že počáteční odhad parametrů pro metalurgické struktury α fázi byl proveden z měření při teplotách 500°C a 650°C a další hodnoty parametrů směrem k T_{20} byly získány v souladu s bodem 7 v **tab. 6.3.3.1 b**). Počáteční odhad parametrů pro γ fázi byl obdrženo z měření při teplotě 800°C (při této teplotě je již určité zastoupení γ fáze) a další hodnoty parametrů směrem k T_T byly extrapolovány dle bodu 7 v **tab. 6.3.3.1 b**) s tím, že u T_T se předpokládaly na základě [45] hodnoty mechanických vlastností v řádu desetin až jednotek MPa.

Parametry K, n, H, C a P se stanoví dle **tab. 6.3.3.2**. Ladění primární i sekundární části creepové křivky je prováděno automaticky přímo v programu SYSWELD pomocí programovacího jazyka SIL. Ladění parametrů spočívá opět ve ztotožnění experimentální křivky s křivkou získanou z numerické simulace creepové zkoušky pro tři různá zatížení. V prvním kroku jsou naladěny parametry K, n popisující primární část creepové křivky pomocí vztahu (13). Dále jsou takto naladěné parametry považovány za fixní. V druhém kroku jsou získány parametry H, C a P popisující sekundární část creepové křivky pomocí vztahu (14). Tento vztah vychází z předpokladu obdržet stejnou směrnicí rovnoběžnou se sekundární částí creepové křivky v nekonečném čase.

Tab. 6.3.3.2 Schematický postup stanovení K, n, H, C, P z creepových zkoušek



6.3.4 Viskoplastické parametry

V **tab. 6.3.4.1 a)** jsou uvedeny hodnoty viskoplastického parametru σ^y . Parametry K, M a N jsou v **tab. 6.3.4.1 b)**. Ty jsou ještě formálně rozděleny na α a γ fázi. Parametry K, n, H, C a P jsou v **tab. 6.3.4.2**.

Tab. 6.3.4.1 a) EVP model materiálu č. 21 - σ^y

T [°C]	σ^y - ZM_ferit+perlit [MPa]	σ^y - ZM_bainit [MPa]	σ^y - SM_ferit+perlit [MPa]
20	380	360	475
200	230	270	380
400	20	125	80
500	0	20	25
600	0	0	0
1500	0	0	0

Tab. 6.3.4.1 b) EVP model materiálu č. 21 - K, M, N

ZM_ferit+perlit				Fáze
T [°C]	K [MPa]	M [-]	N [-]	
20	1250	3,9	4,4	α
200	1850	3,4	6,3	α
400	3000	4,2	7,2	α
500	2500	4,95	6,9	α
650	600	20,0	7,0	α
800	1941	13,5	2,65	$\alpha \rightarrow \gamma$
1500	900	3,5	1,25	γ
ZM_bainit				Fáze
T [°C]	K [MPa]	M [-]	N [-]	
20	1000	8,2	6,9	α
200	1150	9,8	8,4	α
400	1400	11,6	10,5	α
500	1300	11,7	11,0	α
650	2550	9,62	3,75	α
800	2205	12,32	2,6	$\alpha \rightarrow \gamma$
1500	900	3,5	1,25	γ
SM_ferit+perlit				Fáze
T [°C]	K [MPa]	M [-]	N [-]	
20	1250	4,5	4,1	α
200	1500	5,7	5,4	α
400	2600	6,0	7,2	α
500	3500	4,4	7,7	α
650	4093	5,21	3,87	α
800	2500	6,55	2,92	$\alpha \rightarrow \gamma$
1500	900	3,5	1,25	γ

Tab. 6.3.4.2 EVP model materiálu č. 31 - K, n, H, C, P

ZM_ferit+perlit					
T [°C]	log₁₀(K)	n [-]	H [-]	log₁₀(C)	P [-]
500	-13,0	3,8	16500	-50,0	10,0
650	-10,8	3,4	2280	-10,0	4,0
ZM_bainit					
T [°C]	log₁₀(K)	n [-]	H [-]	log₁₀(C)	P [-]
500	-20,2	6,86	8000	-16,0	6,0
650	-10,8	3,42	2050	-8,0	2,0
SM_ferit+perlit					
T [°C]	log₁₀(K)	n [-]	H [-]	log₁₀(C)	P [-]
500	-17,2	5,4	22000	-40,0	12,0
800	-11,5	4,5	220	-13,0	5,0

7 NUMERICKÉ ANALÝZY

Cílem této části práce je zhodnotit a ověřit možnosti a přínos aplikace EVP výpočtového přístupu v porovnání s přístupem EP. V první fázi byly provedeny testovací numerické analýzy (viz kap. 7.1). Cílem bylo jednak 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 (viz kap. 7.2) v souladu s experimentálním programem uvedeným v kap. 5.1. Ve třetí fázi (viz kap. 7.3) 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.

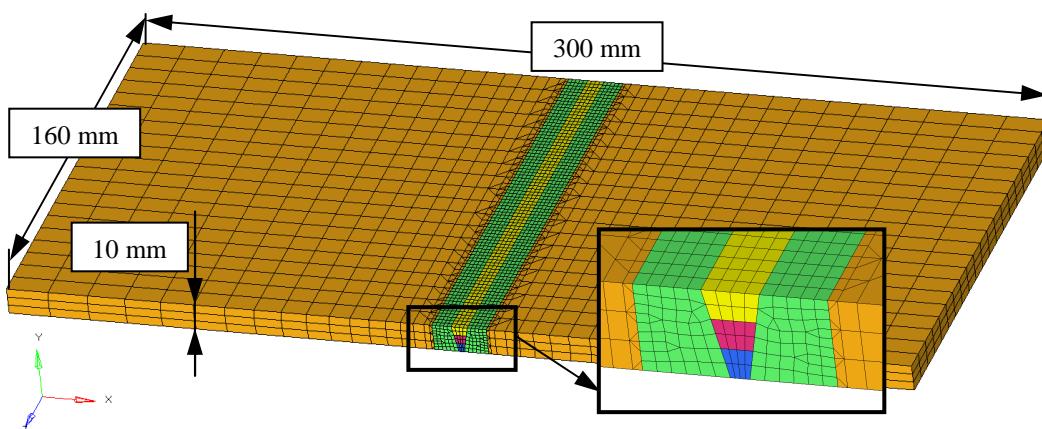
7.1 Testovací analýzy

V rámci testovacích analýz byly provedeny a zhodnoceny následující výpočty:

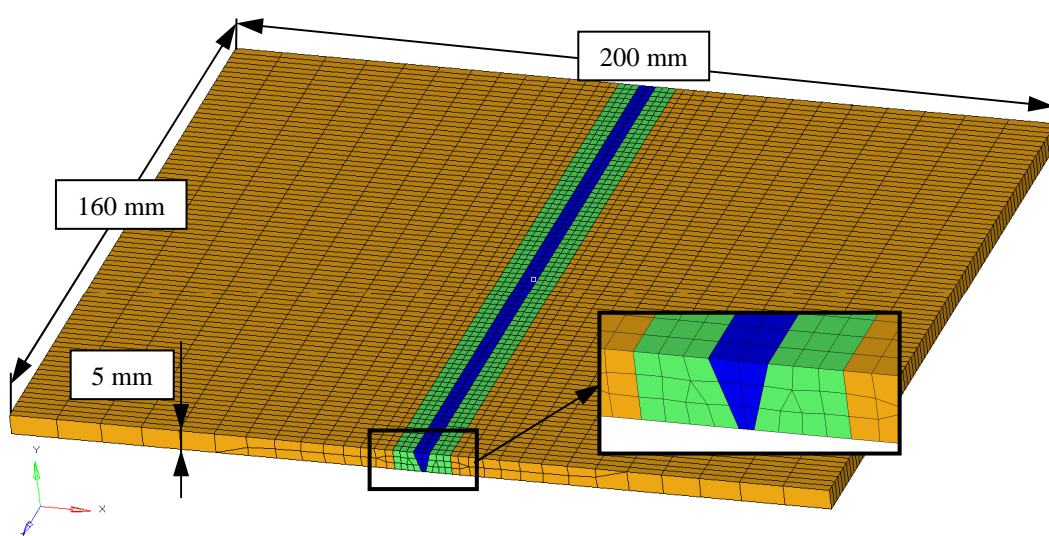
- Vliv jednotlivých modelů materiálu na průběhy zbytkové napjatosti v podmínkách vícevrstvého svařování (viz kap. 7.1.1).
- Vliv modelů materiálu na průběhy zbytkové napjatosti v podmínkách svařování na jeden průchod (viz kap. 7.1.2).
- Zhodnocení vlivu modelů materiálu na průběh a finální hodnoty zbytkové napjatosti v podmínkách TZ (viz kap. 7.1.3).
- 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) (viz kap. 7.1.4).

V analýzách byly uvažovány následující předpoklady:

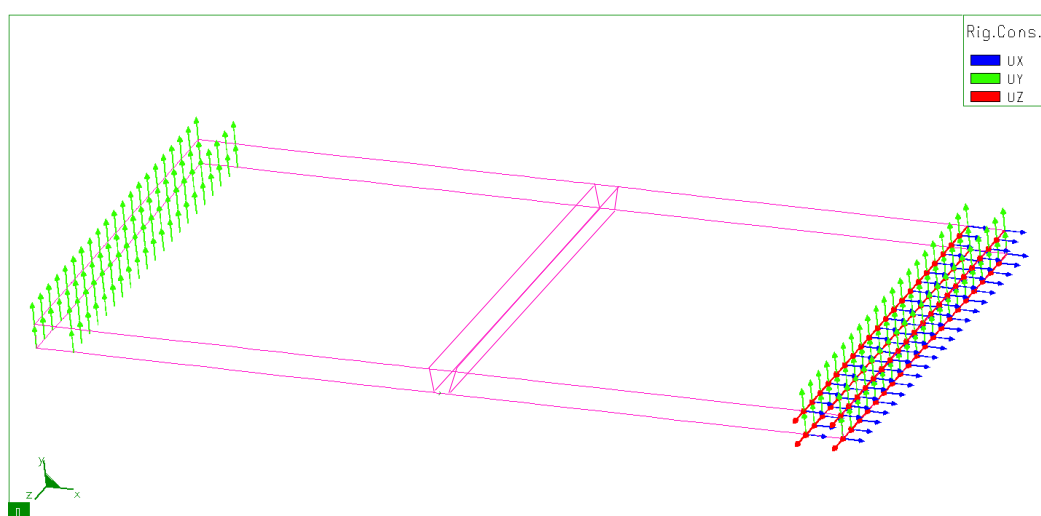
- Analýzy vícevrstvého svařování a TZ byly provedeny na výpočtovém modelu uvedeném na **obr. 7.1.1**. Ten představuje spojení dvou desek třemi svarovými housenkami.
- Analýza svařování na jeden průchod byla provedena na výpočtovém modelu viz **obr. 7.1.2**. Ten představuje spojení dvou desek jednou svarovou housenkou.
- Mechanické OP podmínky byly pro všechny výše uvedené případy uvažovány v souladu s **obr. 7.1.3**. Oblast OP je dostatečně vzdálená od svarového spoje tak, aby nedocházelo k ovlivnění vypočtené zbytkové napjatosti v místě svaru a TOO.
- Teplotní OP v případě svařování - pro zadání vneseného tepla byl použit pohybující se dvouelipsoidní 3D model tepelného zdroje popsany svařovací parametry viz **tab. 5.1.1.1** řádek 2 (použito u jednoručodového i vícevrstvého svařování). Na vnějším povrchu byl definován přestup tepla kombinací konvekce a radiace pro materiálového rozhraní ocel - vzduch dle **obr. 6.1.2**.
- Teplotní OP v případě TZ - zadání teplotního cyklu dle **tab. 5.1.1.1**.
- Aplikace EP a EVP materiálových charakteristik v souladu s kap. 6.



Obr. 7.1.1 Výpočtový model použitý v analýzách vícevrstvého svařování a TZ



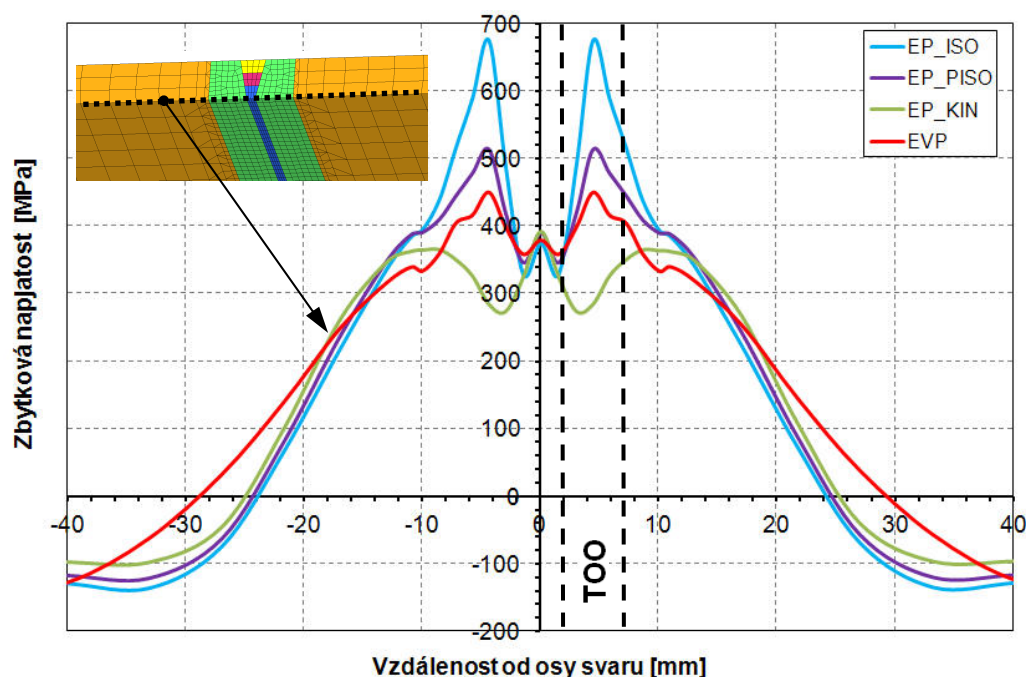
Obr. 7.1.2 Výpočtový model použitý v analýzách svařování na jeden průřeh



Obr. 7.1.3 Znázornění mechanických OP použitých u obou typů výpočtových modelů

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

Vzájemné porovnání výsledných průběhů zbytkové napjatosti v podélném směru při použití rozdílných modelů materiálu je uvedeno na **obr. 7.1.1.1**. Průběhy zbytkové napjatosti jsou vždy vykreslovány uprostřed (ustálený stav) a na spodní straně svařované desky (několikanásobné tepelné ovlivnění - větší vliv viskoplastických efektů než na horní straně). Porovnání je provedeno mezi EP modely materiálu s izotropním zpevněním (EP_ISO), kombinovaným zpevněním (EP_PISO), kinematickým zpevněním (EP_KIN) a EVP modelem materiálu (EVP). V případě EP modelu materiálu s kombinovaným zpevněním byla jako demonstrativní uvažována střední hodnota koeficientu PISO = 0.5 (izotropní a kinematické deformačního zpevnění se každé podílí 50%).



Obr. 7.1.1.1 Zbytková napjatost v podélném směru po vícevrstvěm svařování

Nejvíce náchylnou oblastí z pohledu možného vzniku vad a s tím spojených problémů s pevností a životností svarových spojů je TOO. Proto je důležité zhodnotit vliv použití jednotlivých modelů materiálu na průběhy napjatosti zejména v TOO.

Z porovnání je zřejmé, že použitím EVP modelu materiálu, který zohledňuje viskoplastické efekty (creep, relaxace), dochází při několikanásobném tepelném ovlivnění (větší počet deformačně-napět'ových cyklů) ke snížení hodnot zbytkové napjatosti ve srovnání s EP modelem materiálu s izotropním zpevněním. Naopak v porovnání s EP modelem materiálu s kinematickým zpevněním (většinou podhodnocení napjatosti v TOO) jsou predikované hodnoty zbytkové napjatosti vyšší. V případě porovnání s EP modelem materiálu s kombinovaným zpevněním závisí zbytková napjatost na velikosti koeficientu PISO.

Pokud by byl vyšší, dojde k podobnému nárůstu napjatosti jako u izotropního zpevnění a pokud by byl nižší, může docházet k podhodnocení napjatosti v TOO jako v případě použití kinematického zpevnění. Ovšem nejdůležitější je skutečnost, že se opět jedná o EP model materiálu, který není schopen zohlednit viskoplastické efekty, které při vícevrstevném svařování vznikají.

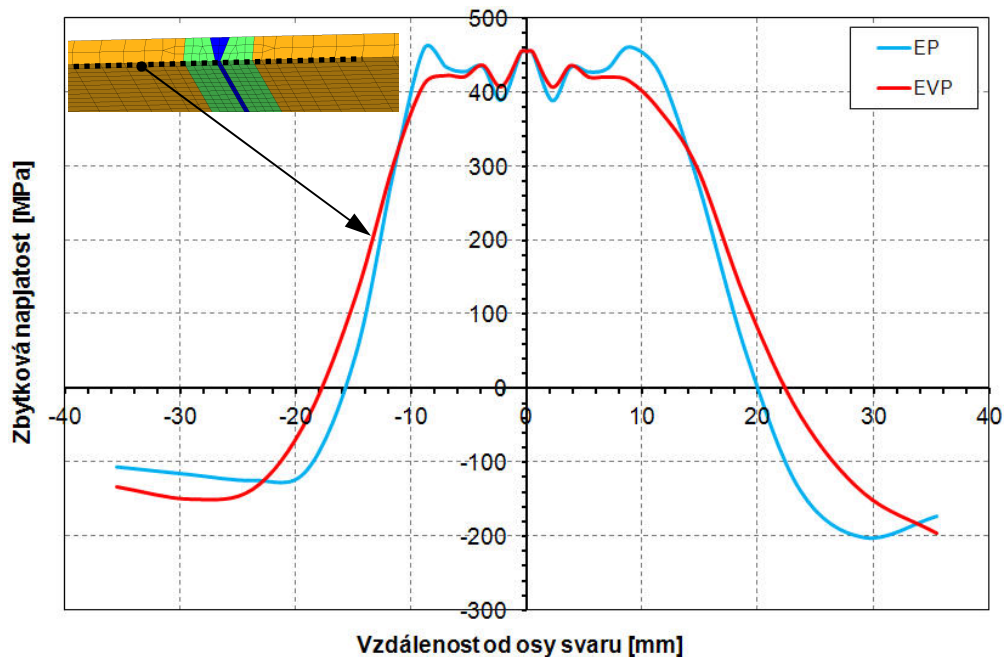
Na základě provedených analýz lze konstatovat následující závěry:

- Průběhy zbytkové napjatosti při použití jednotlivých modelů materiálu dosahují zejména v TOO předpokládaných hodnot a trendů v souladu s kap. 4.3 (EP modely) a kap. 4.4.2 (EVP model).
- Použití EVP modelu materiálu v případě analýz vícevrstevného 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 vícevrstevného svařování.
- Hodnoty zbytkové napjatosti v TOO jsou při použití EVP modelu materiálu kvantitativně nižší než u EP modelu materiálu s izotropním zpevněním (nahodnocování špičkových hodnot zbytkové napjatosti), ale kvantitativně vyšší než u EP modelu materiálu s kinematickým zpevněním (podhodnocování špičkových hodnot zbytkové napjatosti). 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 zcela popsat kinematickým 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 nahodnocování vypočtené zbytkové napjatosti a snaží se jí "uměle" snížit používáním tzv. modifikovaných křivek deformačního zpevnění (více viz kap. 2.1). Potřeba „umělého“ snižování vypočtené zbytkové napjatosti při použití EP modelu materiálu s izotropním zpevněním pravděpodobně potvrzuje nezbytnost zahrnutí vlivu viskoplastických efektů při simulaci vícevrstevného svařování. To je možné pouze vhodnou aplikací EVP modelu materiálu, jak dokumentuje **obr. 7.1.1.1**.

Publikované práce [1, 4, 20, 46] a výsledky uvedené na **obr. 7.1.1.1** se shodují v tom, že použití EP modelů materiálu, kde při vysokých teplotách přestává být aktivní Bauschingerův efekt (chová se téměř ideálně plasticky), vede k podhodnocování zbytkové napjatosti v TOO. Nebezpečí podhodnocování zbytkové napjatosti nastává u kinematického zpevnění a může nastat u kombinovaného zpevnění. Proto budou mezi sebou dále porovnávány pouze výsledky napjatosti pro EVP model materiálu (EVP) a EP model materiálu s izotropním zpevněním (EP).

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

Obr. 7.1.2.1 reprezentuje vzájemné porovnání průběhů zbytkové napjatosti v podélném směru při použití EP a EVP modelu materiálu. Průběhy zbytkové napjatosti jsou vykreslovány uprostřed (ustálený stav) a na spodní straně svařované desky.



Obr. 7.1.2.1 Zbytková napjatost v podélném směru po svařování na jeden průchod

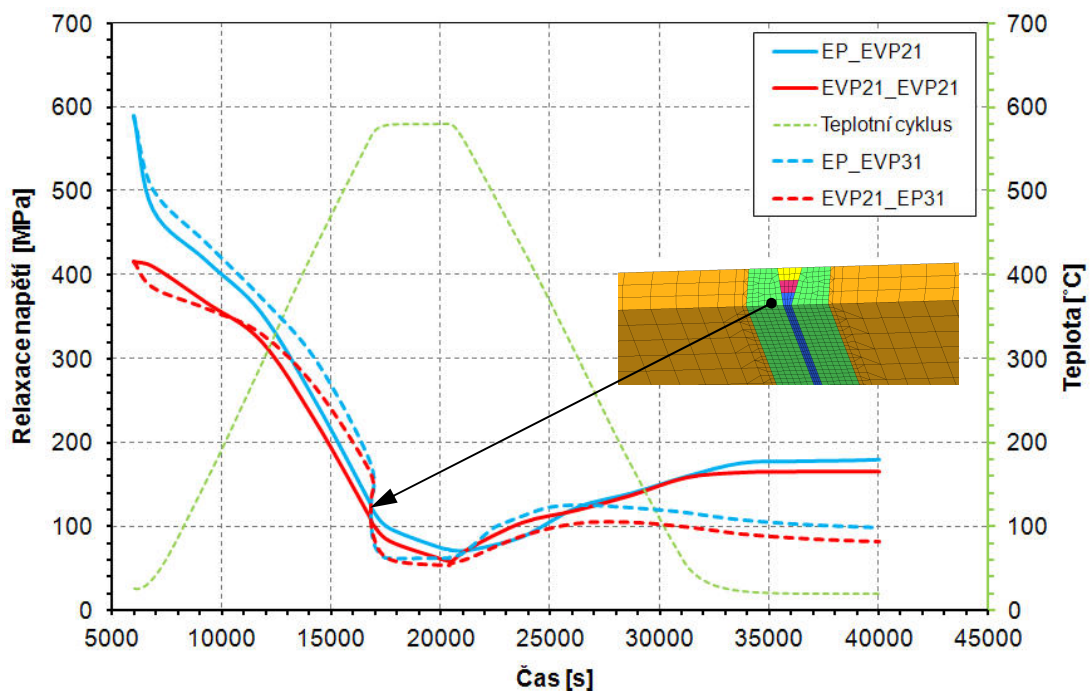
Z porovnání je patrné, že pokud je EVP model materiálu použit v případě, kdy nedochází k několikanásobnému tepelnému ovlivnění dané oblasti (vícevrstvé svařování) nebo tepelné ovlivnění nedosahuje dostatečně dlouhých časů (TZ), je vliv viskoplastických efektů zanedbatelný. Naopak v případě EP modelu materiálu ještě nedochází v rámci jednoho deformačně-napěťového cyklu k nereálnému nárůstu zbytkové napjatosti jako v případě většího počtu cyklů (vícevrstvé svařování). Oba přístupy (EP i EVP) jsou tedy v případě analýz svařování na jeden průchod téměř srovnatelné.

Na základě provedených analýz lze konstatovat následující závěry:

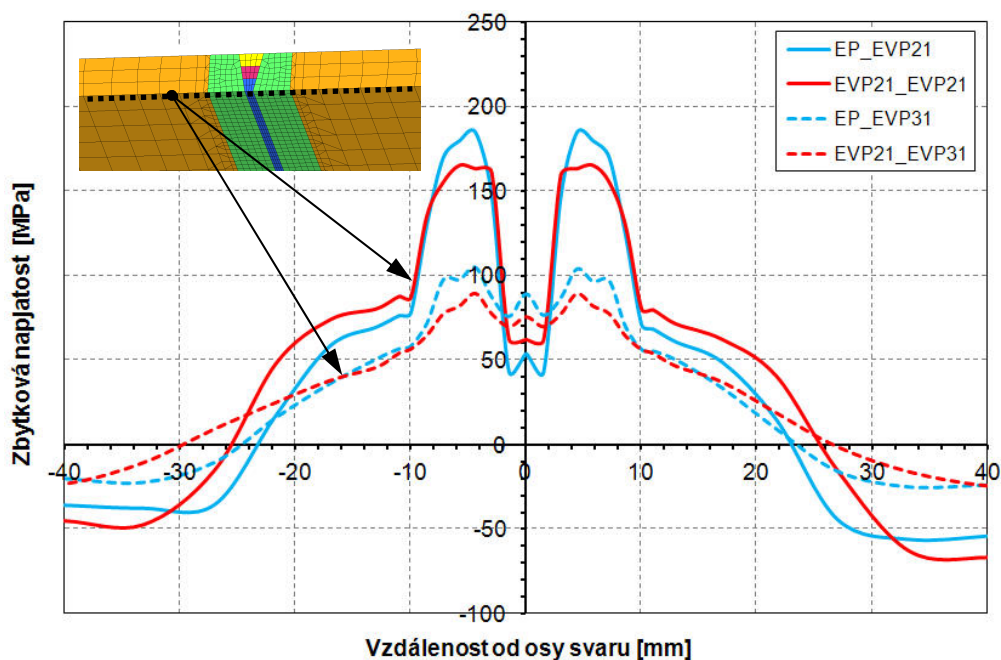
- Hodnoty zbytkové napjatosti při svařování na jeden průchod jsou kvalitativně i kvantitativně téměř srovnatelné pro EP i EVP výpočtový přístup. Zanedbatelný vliv viskoplastických efektů při analýzách svařování na jeden průchod potvrzuje i publikace [1].
- Z pohledu provádění praktických analýz svařování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

7.1.3 Vliv EVP modelů materiálu na zbytkovou napjatost v podmínkách TZ

Obr. 7.1.3.1 představuje vývoj zbytkové napjatosti v průběhu teplotního cyklu TZ a **obr. 7.1.3.2** porovnání výsledné zbytkové napjatosti dosažené po TZ v závislosti jednak na počátečních podmínkách TZ (analýzy svařování provedeny buď EP nebo EVP přístupem - model č. 21) a dále na použitých EVP modelech materiálu (modely č. 21 a 31). V legendě je vždy na prvním místě uveden model materiálu použitý u analýzy svařování a na druhém místě model materiálu použitý pro analýzu TZ.



Obr. 7.1.3.1 Vývoj podélné zbytkové napjatosti v průběhu teplotního cyklu TZ



Obr. 7.1.3.2 Zbytková napjatost v podélném směru po TZ

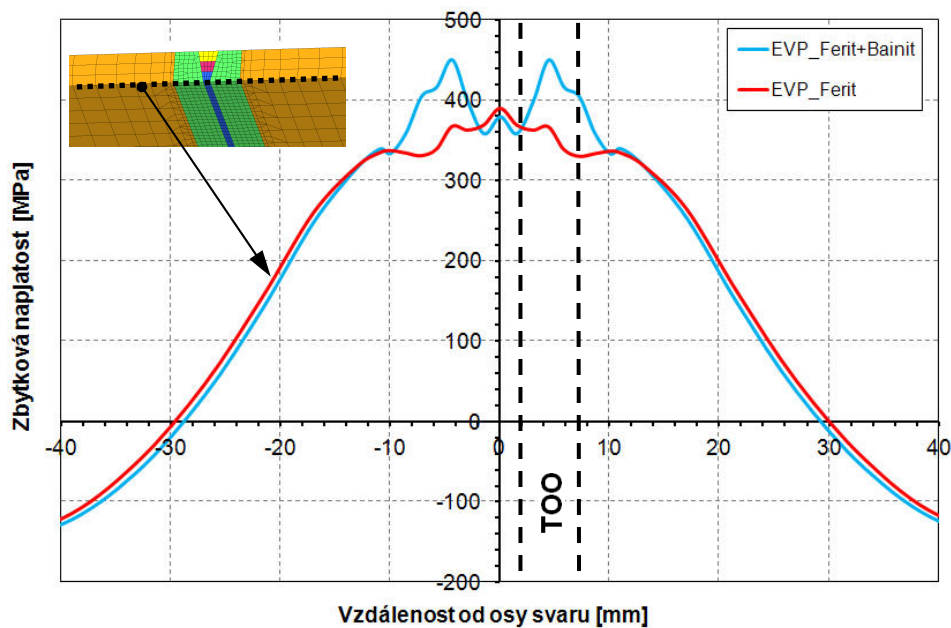
Cílem analýz je následující. V první fázi ověření nutnosti použití EVP modelu materiálu při na sebe navazujících numerických analýzách svařování a TZ. To znamená zjistit, jestli je konečná hodnota zbytkové napjatosti získaná z analýzy TZ závislá nebo nezávislá na počátečních podmínkách analýzy TZ. Počáteční podmínkou analýzy TZ je myšlena finální zbytková napjatost vypočtená v rámci analýz svařování buď pouze s EP (vyšší hodnoty zbytkové napjatosti v TOO) nebo EVP (nižší hodnoty zbytkové napjatosti v TOO) modelem materiálu. V druhé fázi ověřit vliv EVP modelů materiálu č. 21 a č. 31 na konečné hodnoty zbytkové napjatosti získané z analýz TZ za předpokladu stejných počátečních podmínek TZ. Stejnou počáteční okrajovou podmínkou je myšleno, že oba EVP modely materiálů (21 a 31) použité pro analýzu TZ začínají relaxovat ze stejných hodnot zbytkové napjatosti získané buď z EP nebo z EVP analýzy svařování.

Na základě provedených analýz lze konstatovat následující závěry:

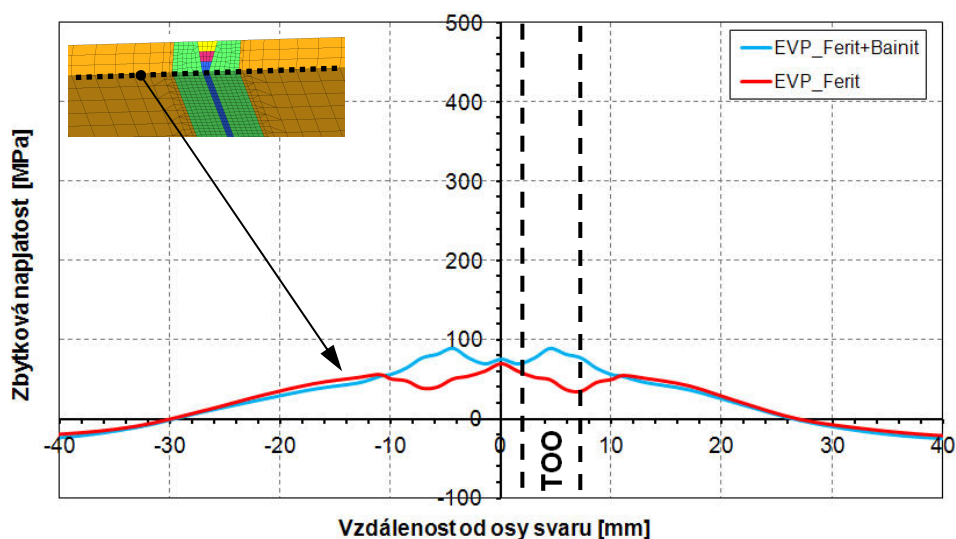
- Konečné hodnoty zbytkové napjatosti získané z analýz TZ jsou v případě obou EVP modelů materiálu (21 i 31) téměř nezávislé na počáteční podmínce analýzy TZ. Kvantitativní rozdíly jsou řádově v jednotkách MPa. Výše uvedené výsledky byly získány z teplotního cyklu při cca 580°C. V případě teplotních cyklů TZ prováděných při vyšších teplotách (až do 690°C v případě TZ ke snížení zbytkových napětí po svařování) jsou rozdíly mezi nimi 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 dle kap. 7.1.2 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.

7.1.4 Vliv absence viskoplastických parametrů výsledných metalurgických struktur na zbytkovou napjatost

Na následujících obrázcích je uvedeno porovnání průběhů zbytkové napjatosti v podélném směru po svařování (viz **obr. 7.1.4.1**) a TZ (viz **obr. 7.1.4.2**). V uvedených analýzách byly použity viskoplastické parametry stanovené pouze z výchozí struktury (před svařováním) a dále viskoplastické parametry stanovené ze všech výsledných (po svařování) metalurgických struktur. Jako výchozí metalurgická struktura je uvažována feriticko-perlitická struktura ZM a výsledné metalurgické struktury reprezentují feriticko-perlitická a bainitická struktura ZM. U SM je výchozí i výsledná metalurgická struktura díky rychlostem ochlazování stále feriticko-perlitická.



Obr. 7.1.4.1 Zbytková napjatost v podélném směru po vícevrstevném svařování



Obr. 7.1.4.2 Zbytková napjatost v podélném směru po TZ (model č. 31)

Cílem těchto testovacích analýz je zjistit, jak se změní hodnoty zbytkové napjatosti v případě, že nebudou k dispozici experimentální data, respektive viskoplastické parametry, pro všechny metalurgické struktury vzniklé svařováním (zejména v TOO), ale pouze pro výchozí metalurgickou strukturu. Taková situace může v praxi nastat z následujících dvou důvodů. Buď potřebná měření zatím nebyla provedena a v čase definovaném na vypracování praktického úkolu to není možné realizovat nebo je velice obtížné vytvořit zkušební vzorky tak, aby jejich metalurgická struktura odpovídala strukturám vzniklým v podmínkách svařování - martenzit, bainit a jejich modifikace (zejména v případě bainitické struktury).

Na základě provedených analýz lze konstatovat následující závěry:

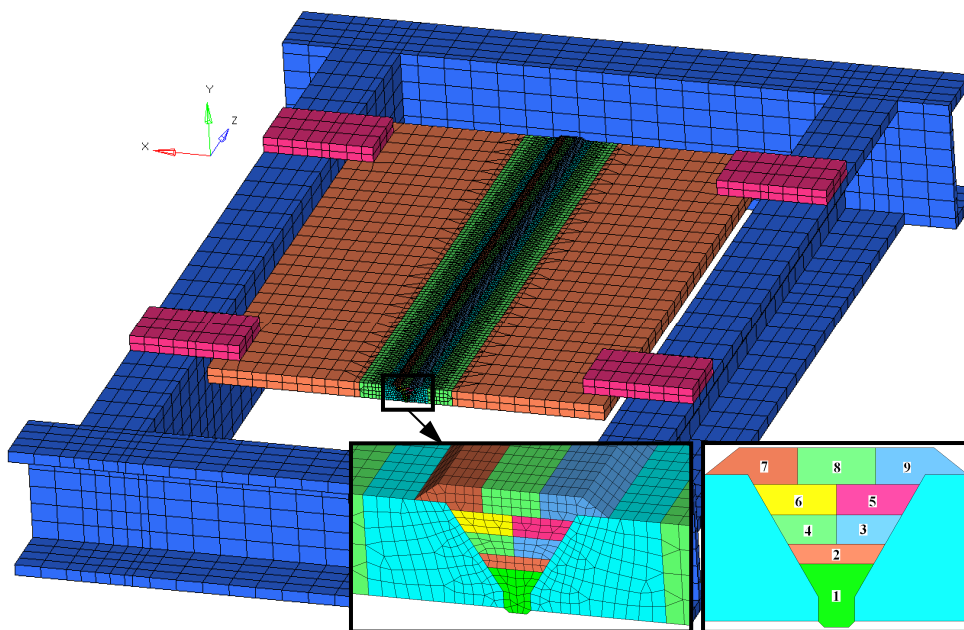
- Zbytková napjatost zejména v oblasti TOO dosahuje při použití viskoplastických parametrů stanovených pouze z výchozí metalurgické struktury materiálu kvantitativně nižších hodnot ve srovnání s parametry získaných ze všech výsledných metalurgických struktur a to jak v případě numerických analýz svařování, 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, jak pro analýzy svařování, tak i pro analýzy TZ.

7.2 Verifikační analýzy

V této kapitole jsou uvedeny výsledky EP a EVP numerických analýz svařování a TZ, které byly provedeny v souladu s experimentálním programem (viz kap. 5). 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.

7.2.1 Výpočtový model

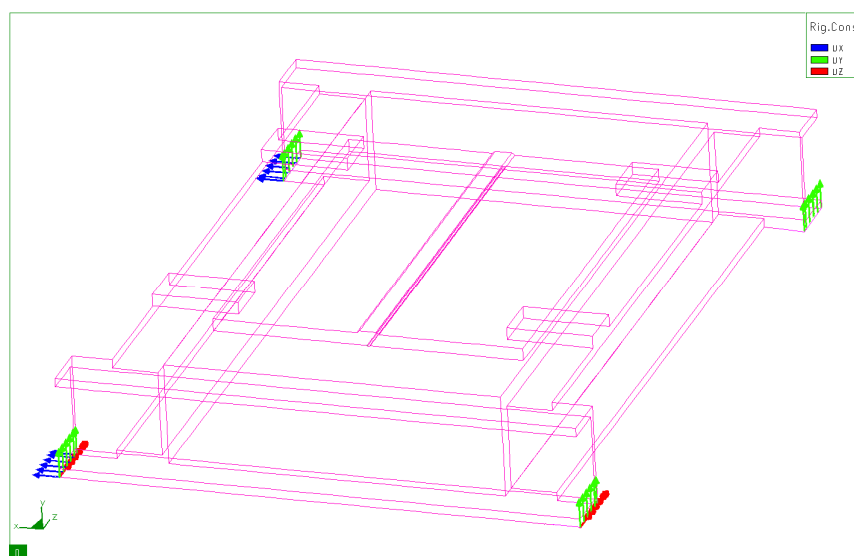
Podle výkresu na **obr. 5.1.1.2** byl vytvořen 3D výpočtový model (viz **obr. 7.2.1.1**) pro provedení numerických analýz s pohybujícím se tepelným zdrojem. Ten byl diskretizován v programu Hypermesh V 11.0 pomocí 108684 prvků s celkem 92805 uzly. Oblast svarového spoje (velikosti a pořadí jednotlivých svarových housenek) byla provedena dle makrostruktury svarového spoje na **obr. 5.1.1.4**. V oblasti svarových housenek a TOO byla v souladu s požadavky na provádění numerických analýz s pohybujícím se tepelným zdrojem dle [30] vytvořena jemnější diskretizace o průměrné velikosti prvků $1 \div 2$ mm. V oblastech dále od TOO směrem k okrajům výpočtového modelu byla použita hrubší diskretizace. Jednotlivým částem výpočtového modelu byly v programu SYSWELD přiřazeny odpovídající fyzikální vlastnosti uvedené v kap. 6.



Obr. 7.2.1.1 Výpočtový model - svaření dvou desek v rámu pomocí 9 svarových housenek

7.2.2 Okrajové podmínky

V případě analýzy svařování byly pro každou svarovou housenku teplotní OP definovány zadáním vneseného tepla pomocí pohybujícího se dvouelipsoidního 3D modelu tepelného zdroje popsaného svařovacími parametry viz **tab. 5.1.1.1**. V případě analýzy TZ byla do uzlů na vnějším povrchu výpočtového modelu zadána teplota v závislosti na čase v souladu s parametry cyklu TZ uvedeného v **tab. 5.1.1.1**. Ochlazování vnějšího povrchu bylo definováno přestupem tepla kombinací konvekce a radiace pro materiálového rozhraní ocel - vzduch dle **obr. 6.1.2**. Mechanické deformační OP (viz **obr. 7.2.2.1**) byly zvoleny tak, aby co nejvíce korespondovaly s experimentem (svařování - volně položený svařenec, TZ - možnost dilatace svařence v průběhu teplotního cyklu). Mech. silové OP nebyly aplikovány.



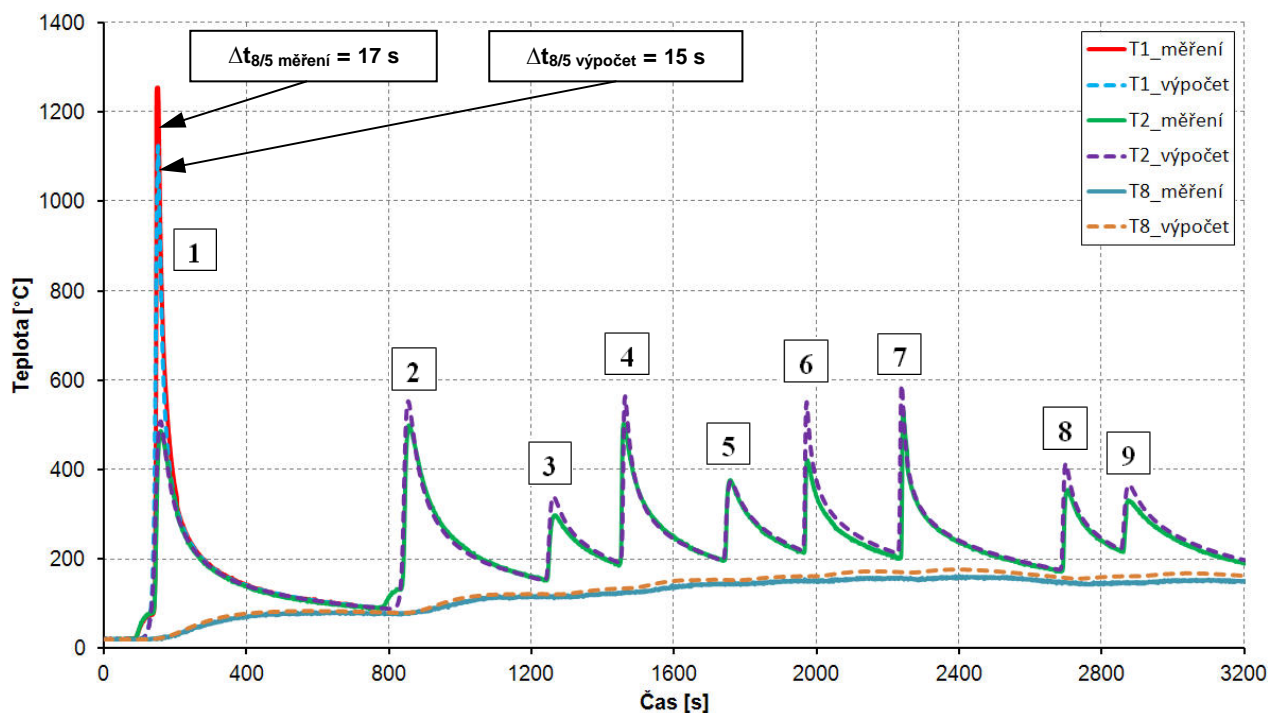
Obr. 7.2.2.1 Použité mechanické deformační OP výpočtového modelu

7.2.3 Výsledky teplotně-strukturních analýz

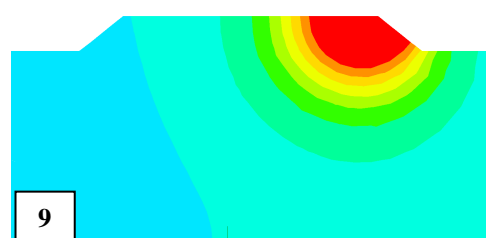
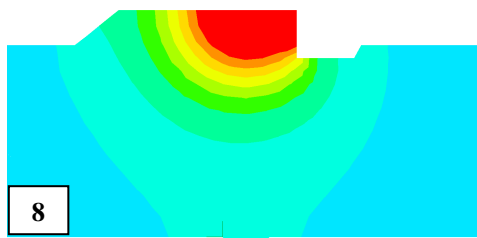
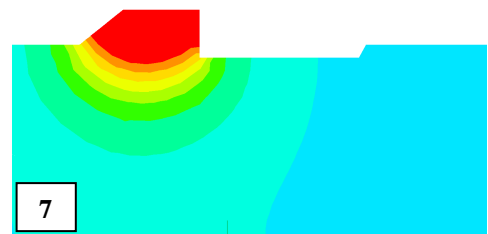
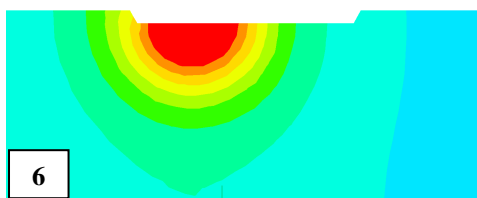
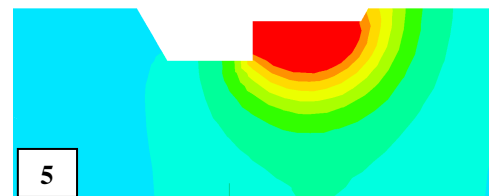
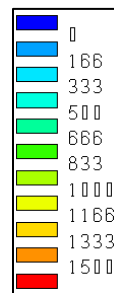
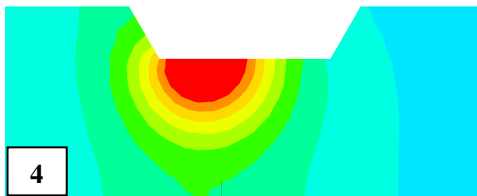
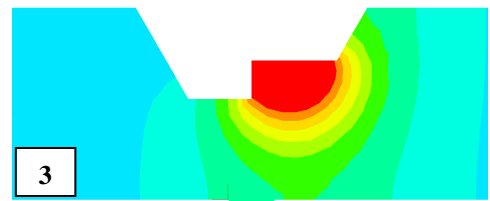
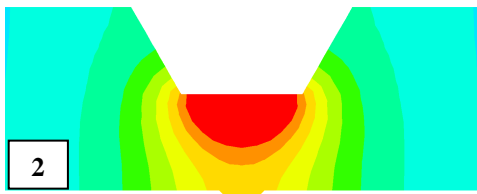
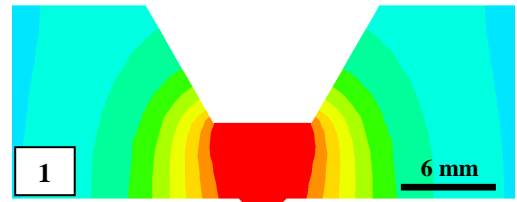
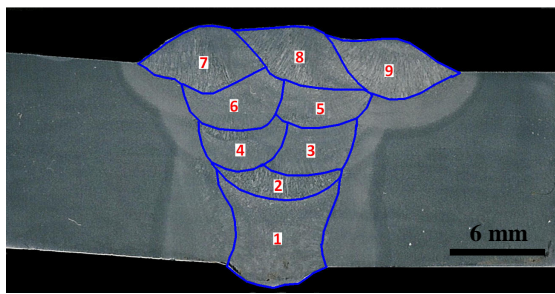
V první fázi byly provedeny teplotně-strukturní analýzy svařování a TZ. Výsledky teplotně-strukturních analýz slouží dále jako přímý vstup, respektive jediné zatížení, vstupující do mechanicko-strukturních analýz a to jak EP, tak i EVP. To znamená, že výsledky teplotně-strukturních analýz by měly co nejvíce korespondovat s výsledky z reálného experimentálního měření, neboť přímo rozhodují o přesnosti vypočtené zbytkové napjatosti ve fázi mechanicko-strukturní analýzy.

Vzájemné porovnání vypočtených a měřených výsledků bylo provedeno v případě teplotních cyklů (viz **obr. 7.2.3.1**) (z důvodů přehlednosti nejsou vykreslovány výsledky ze všech termočlánků, u termočlánku T1 je teplota vykreslena pouze pro první teplotní cyklus z důvodů porovnání $\Delta t_{8/5}$), velikostí protavených oblastí jednotlivých svarových housenek (viz **obr. 7.2.3.2**), rozložení výsledných metalurgických struktur (viz **obr. 7.2.3.4**) a s tím související porovnání průběhů tvrdosti (viz **obr. 7.2.3.5**) přes základní materiál, TOO a svarový kov. **Obr. 7.2.3.3** pro úplnost reprezentuje charakter a rozložení teplotního pole v okolí pohybujícího se tepelného zdroje pro jednotlivé svarové housenky.

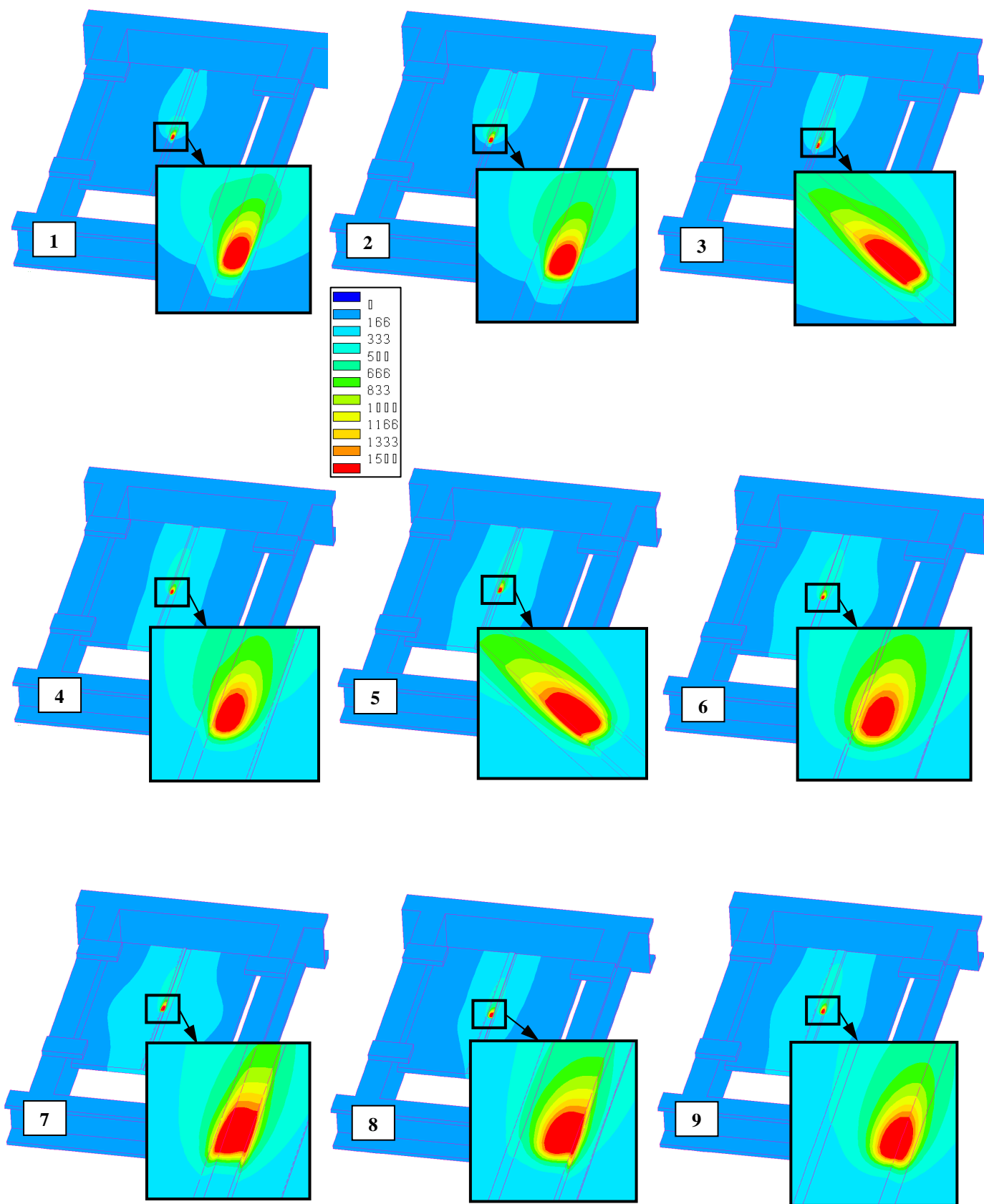
Výše uvedené výsledky analýz se zatím týkaly pouze svařování. V případě analýz tepelného zpracování bylo důležité dodržet rychlost ohřevu, výdrž a rychlost ochlazení přesně v souladu s předepsaným teplotním cyklem aplikovaným v experimentu. Dodržení předepsaného teplotního cyklu TZ, pomocí vykreslení teplotních polí v jednotlivých fázích cyklu, je zobrazeno na **obr. 7.2.3.6**.



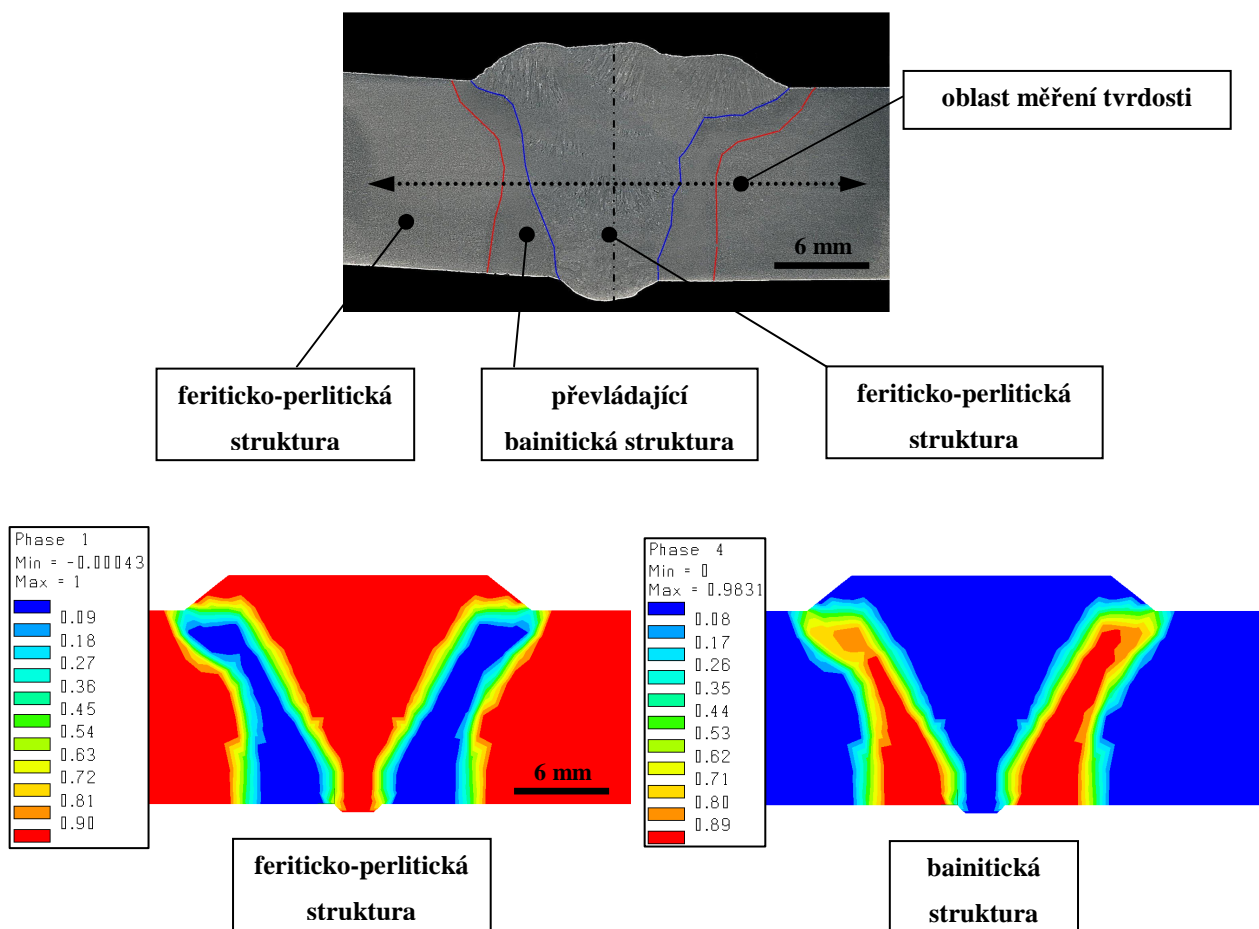
Obr. 7.2.3.1 Porovnání měřených a vypočtených teplotních cyklů pro svarové housenky 1 až 9



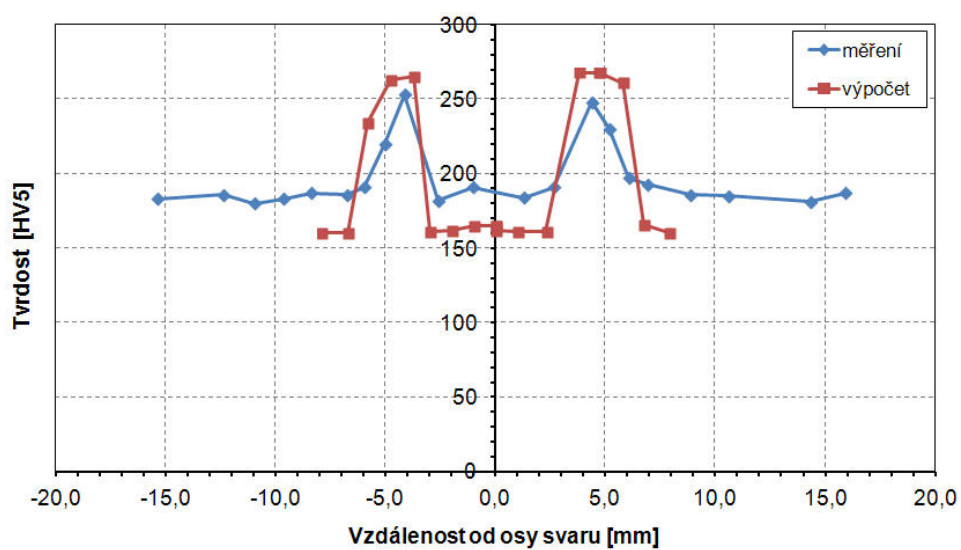
Obr. 7.2.3.2 Porovnání skutečné a vypočtené velikosti a charakteru protavených oblastí pro svarové housenky 1 až 9 (barevná stupnice je ve [°C])



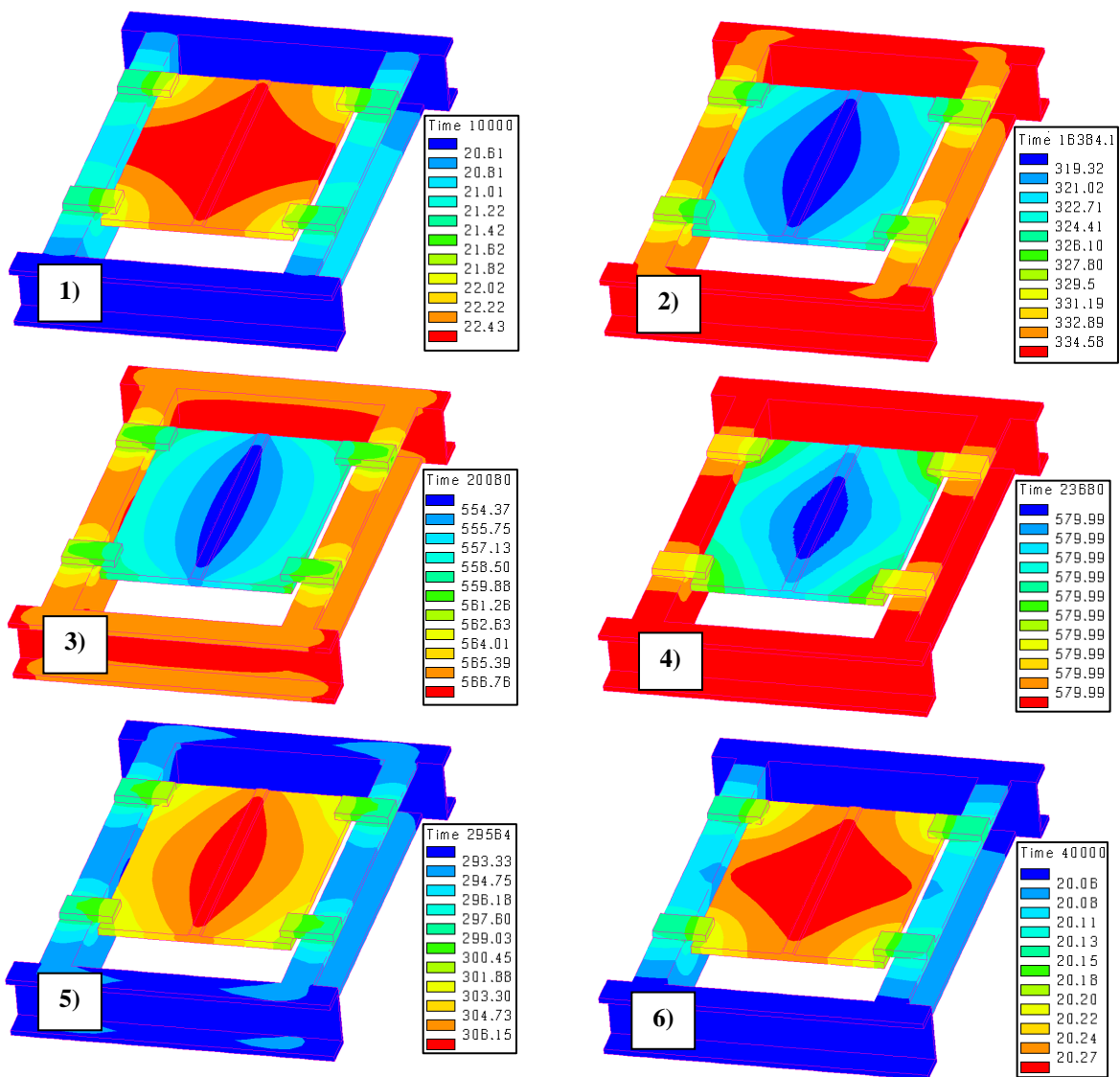
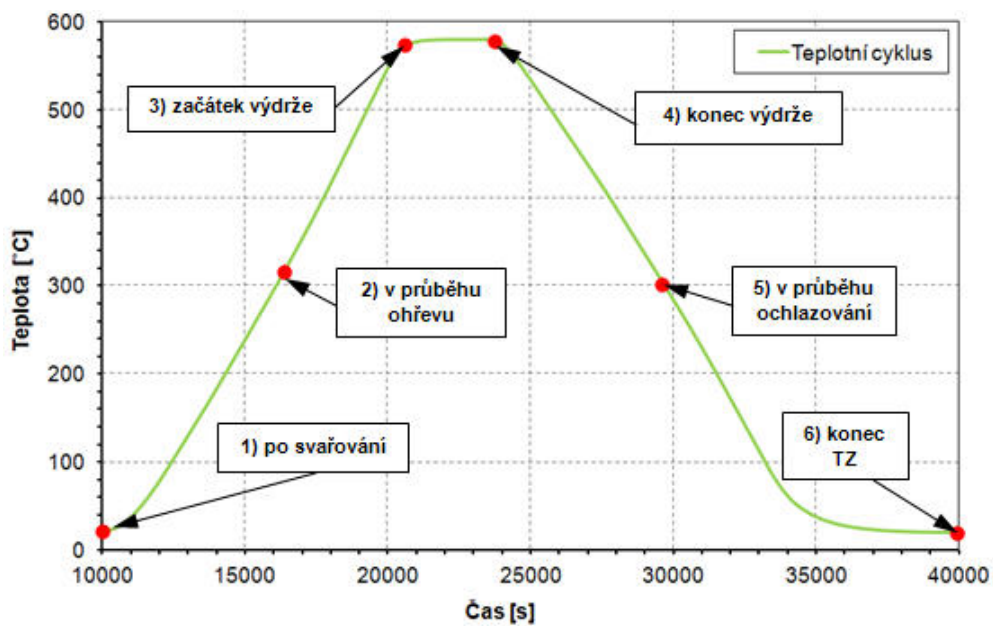
Obr. 7.2.3.3 Teplotní pole [°C] v průběhu svařování v okolí pohybujícího se tepelného zdroje pro svarové housenky 1 až 9



Obr. 7.2.3.4 Porovnání skutečného a vypočteného rozložení výsledných metalurgických struktur



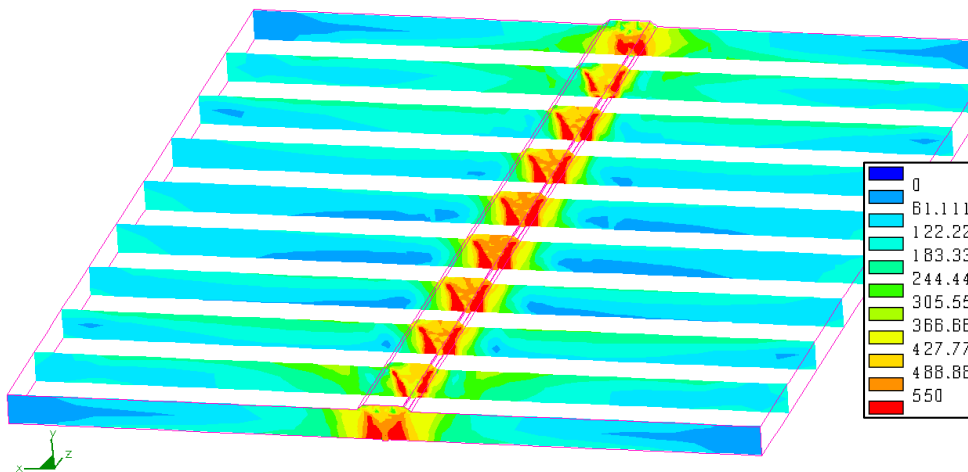
Obr. 7.2.3.5 Porovnání měřeného a vypočteného profilu tvrdosti



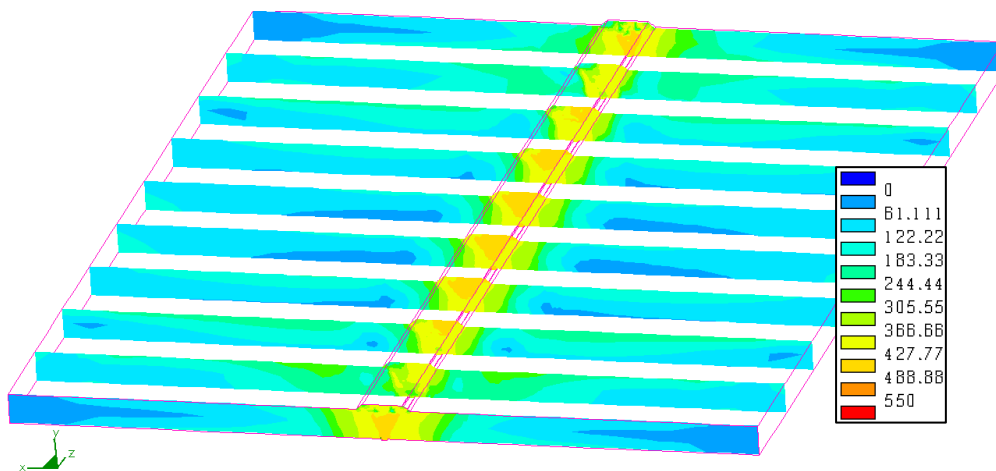
Obr. 7.2.3.6 Teplotní pole [°C] v jednotlivých fázích teplotního cyklu TZ

7.2.4 Výsledky mechanicko-strukturních analýz

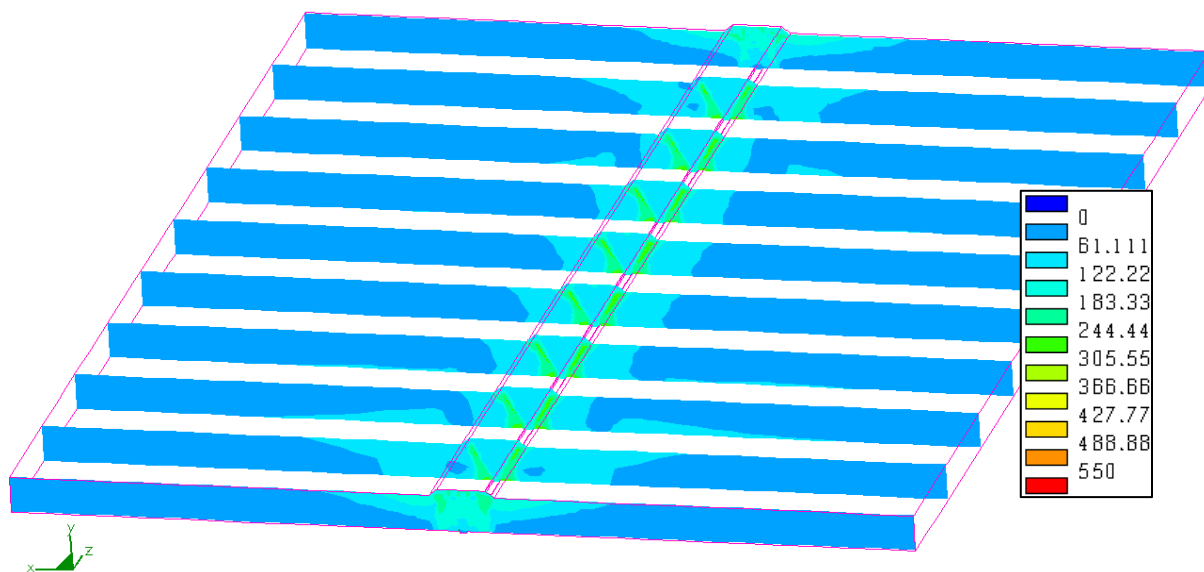
Ve druhé fázi byly provedeny mechanicko-strukturní analýzy svařování a TZ. Porovnání vypočtené zbytkové napjatosti nejprve vzájemně mezi sebou a dále s výsledky experimentálního měření je vždy provedeno ve fázi svařování pro EP (izotropní zpevnění) a EVP (model č. 21) model materiálu a ve fázi TZ pro EVP (model č. 21) a EVP (model č. 31) model materiálu. Na **obr. 7.2.4.1** až **obr. 7.2.4.4** je uvedeno porovnání vypočtené redukované zbytkové napjatosti, **obr. 7.2.4.5** až **obr. 7.2.4.11** reprezentuje porovnání vypočtené zbytkové napjatosti v podélném směru a na **obr. 7.2.4.12** až **obr. 7.2.4.18** je uvedeno porovnání vypočtené zbytkové napjatosti v příčném směru. Porovnání vypočtených a měřených průběhů maximálních hlavních zbytkových napětí po svařování a TZ je znázorněno na **obr. 7.2.4.19** a **obr. 7.2.4.20**. Průběhy vypočtené zbytkové napjatosti jsou vždy vykreslovány uprostřed desky (myšleno v ose Z) a na horní straně desky, uprostřed desky a spodní straně desky (myšleno ve směru osy Y). Průběhy měřené zbytkové napjatosti jsou vždy vykreslovány uprostřed desky (myšleno v ose z) a na horní straně desky (myšleno ve směru osy Y).



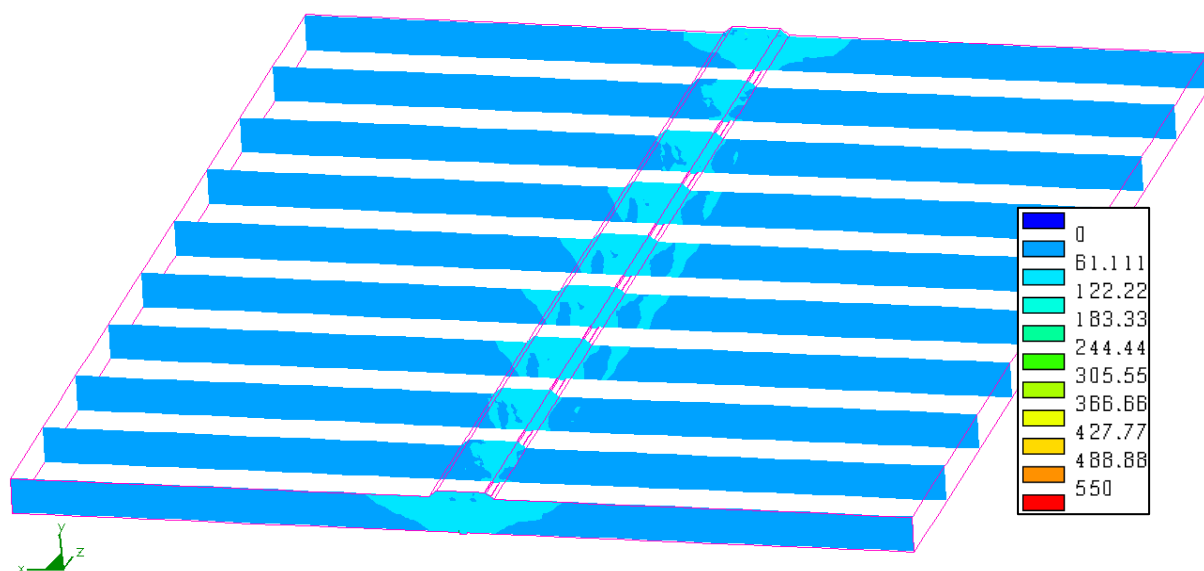
Obr. 7.2.4.1 Redukovaná zbytková napjatost dle HMH [MPa] po svařování - EP model materiálu



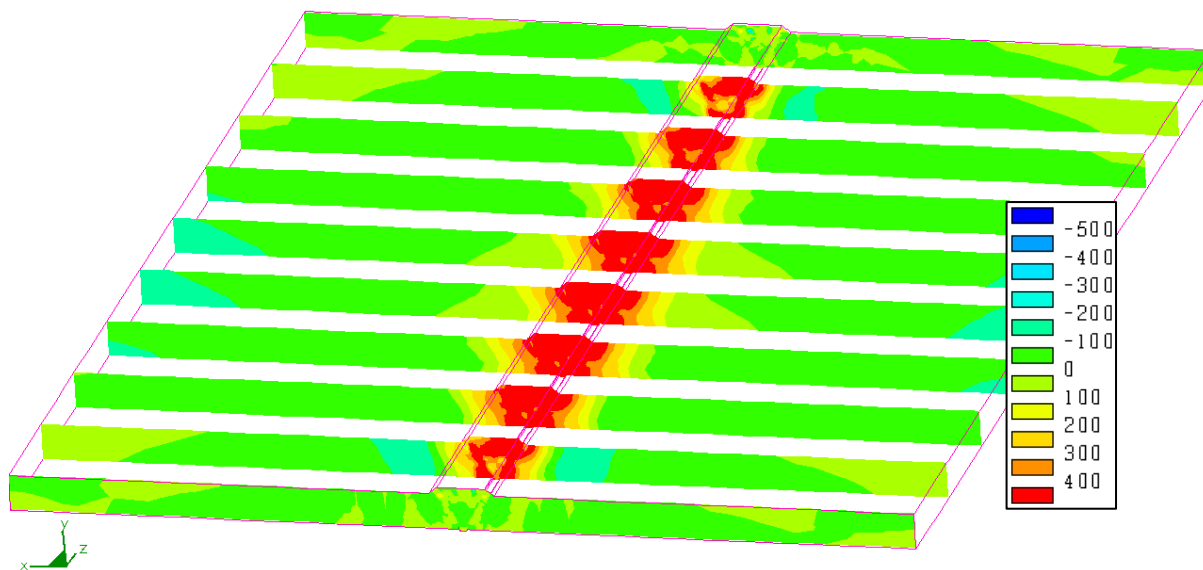
Obr. 7.2.4.2 Redukovaná zbytková napjatost dle HMH [MPa] po svařování - EVP model materiálu



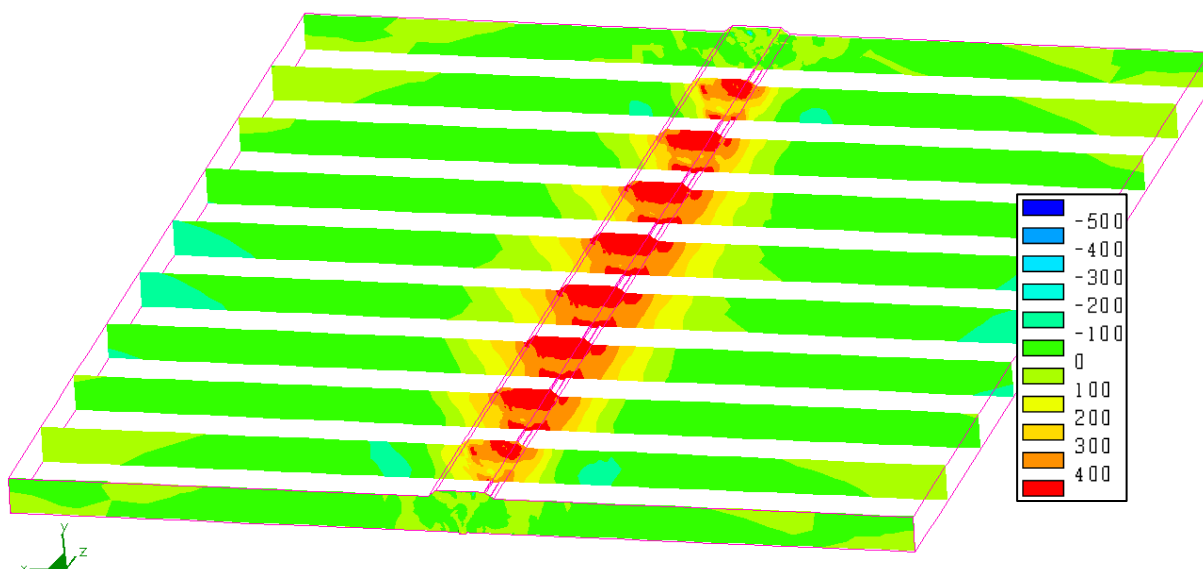
Obr. 7.2.4.3 Redukovaná zbytková napjatost dle HMH [MPa] po tepelném zpracování - EVP model materiálu č. 21



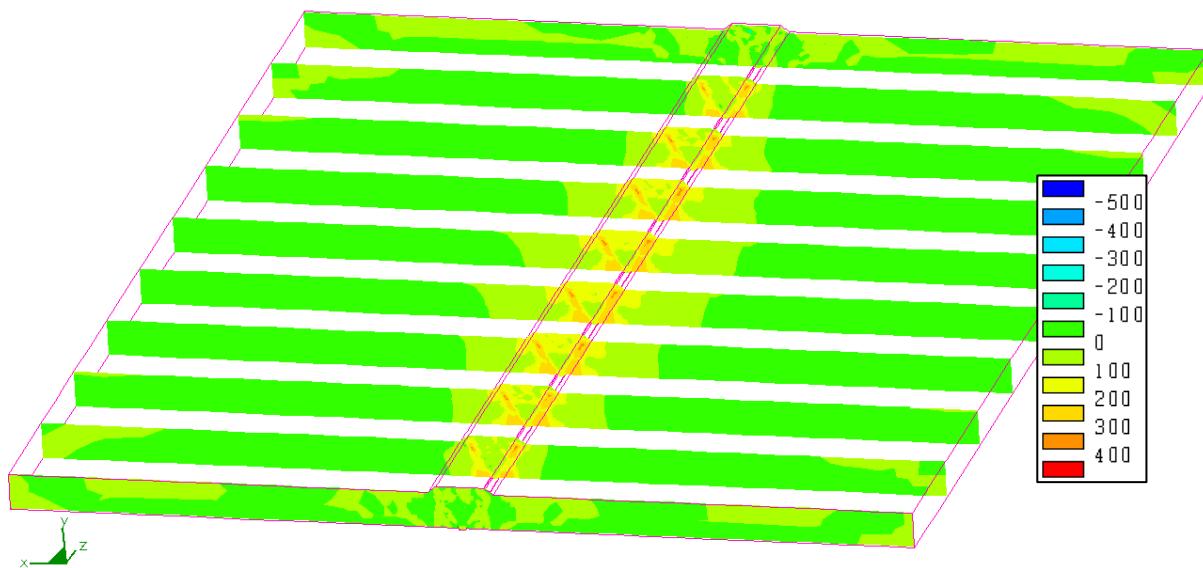
Obr. 7.2.4.4 Redukovaná zbytková napjatost dle HMH [MPa] po tepelném zpracování - EVP model materiálu č. 31



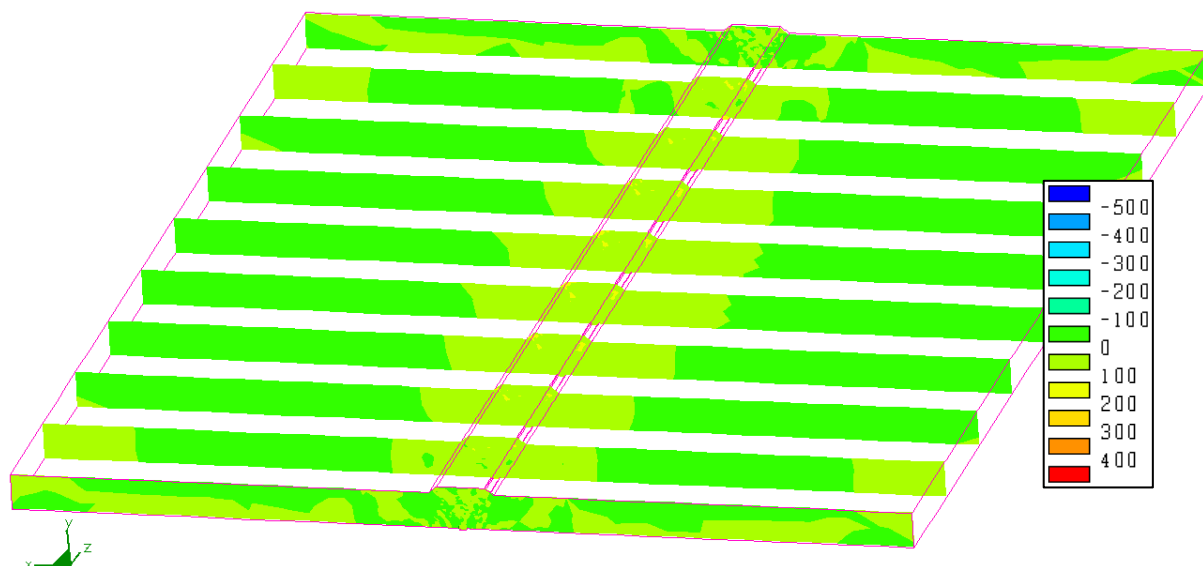
Obr. 7.2.4.5 Zbytková napjatost v podélném směru (osa Z) [MPa] po svařování - EP model materiálu



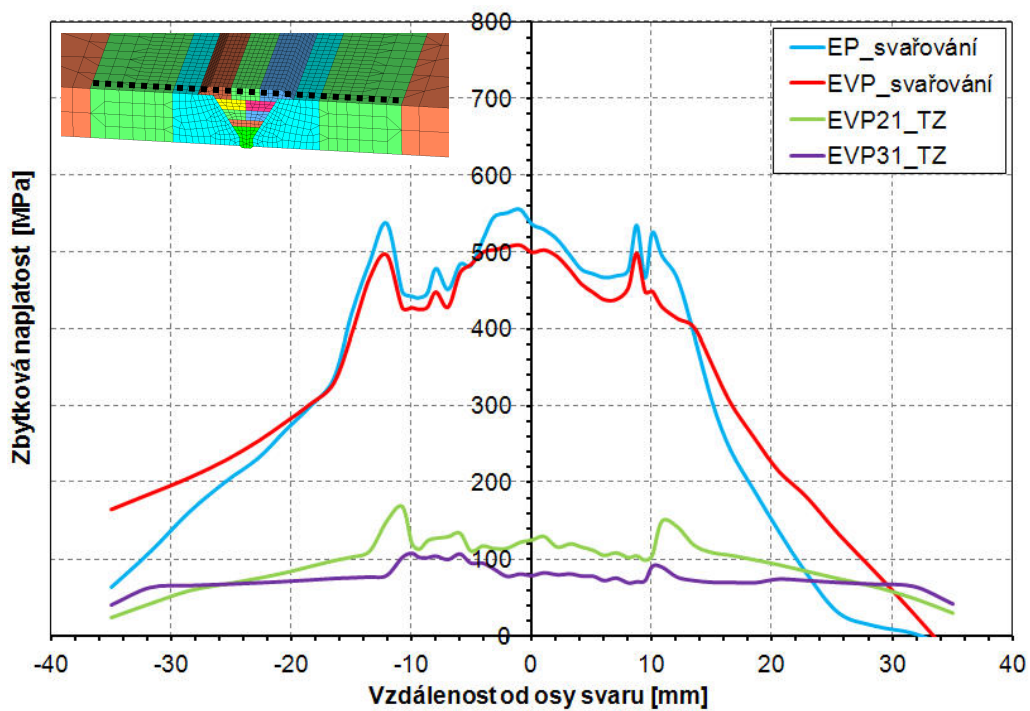
Obr. 7.2.4.6 Zbytková napjatost v podélném směru (osa Z) [MPa] po svařování - EVP model materiálu



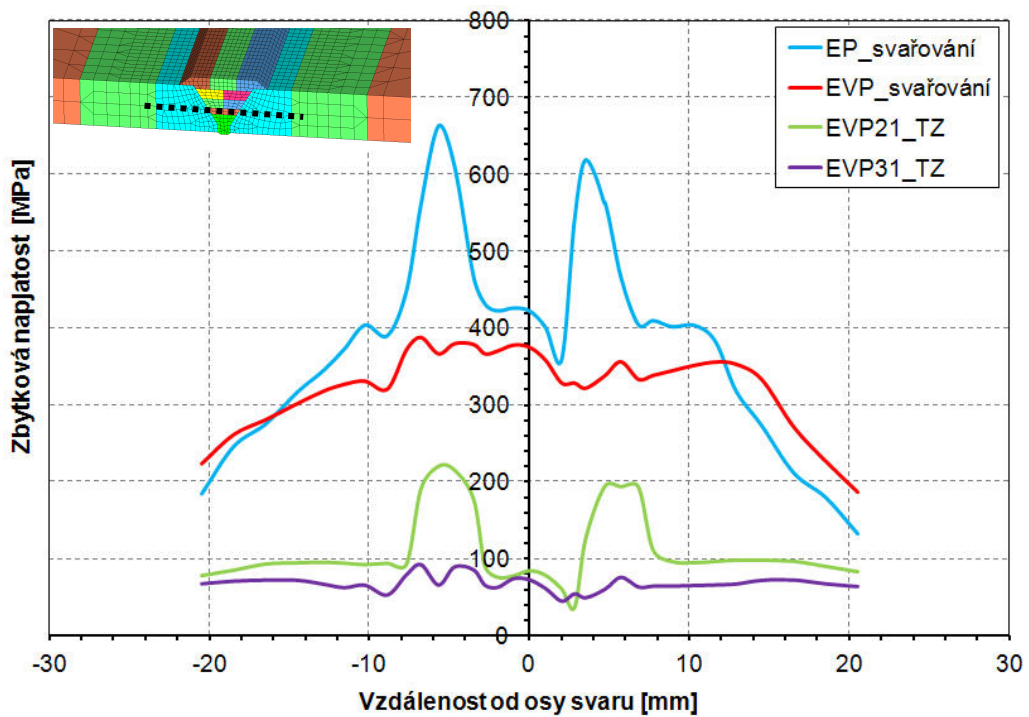
Obr. 7.2.4.7 Zbytková napjatost v podélném směru (osa Z) [MPa] po tepelném zpracování - EVP model materiálu č. 21



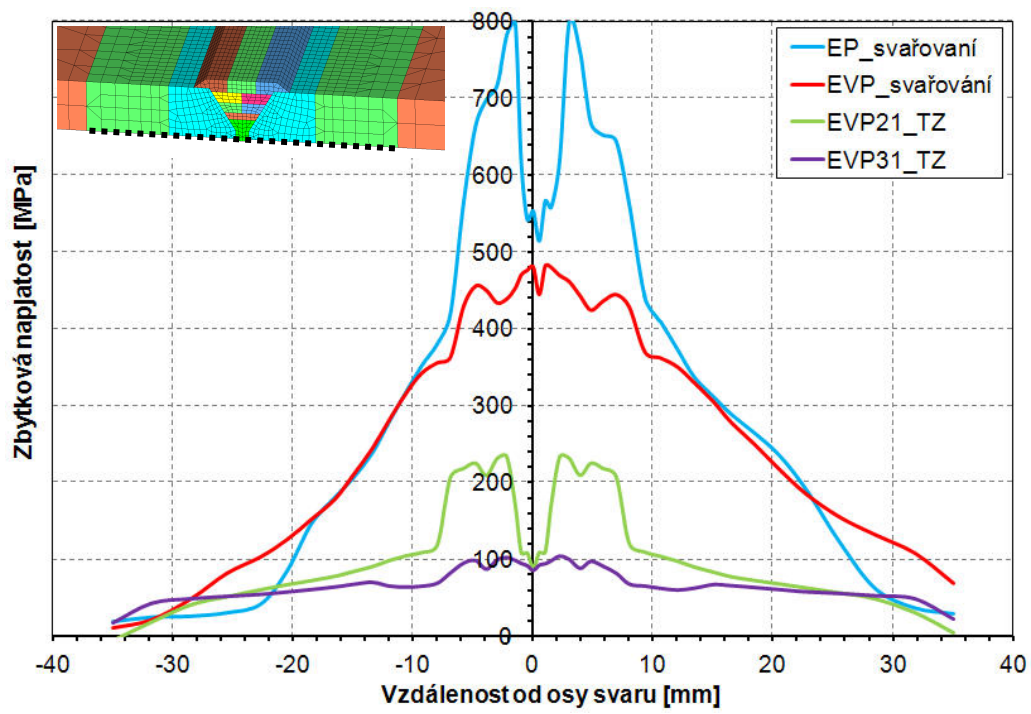
Obr. 7.2.4.8 Zbytková napjatost v podélném směru (osa Z) [MPa] po tepelném zpracování - EVP model materiálu č. 31



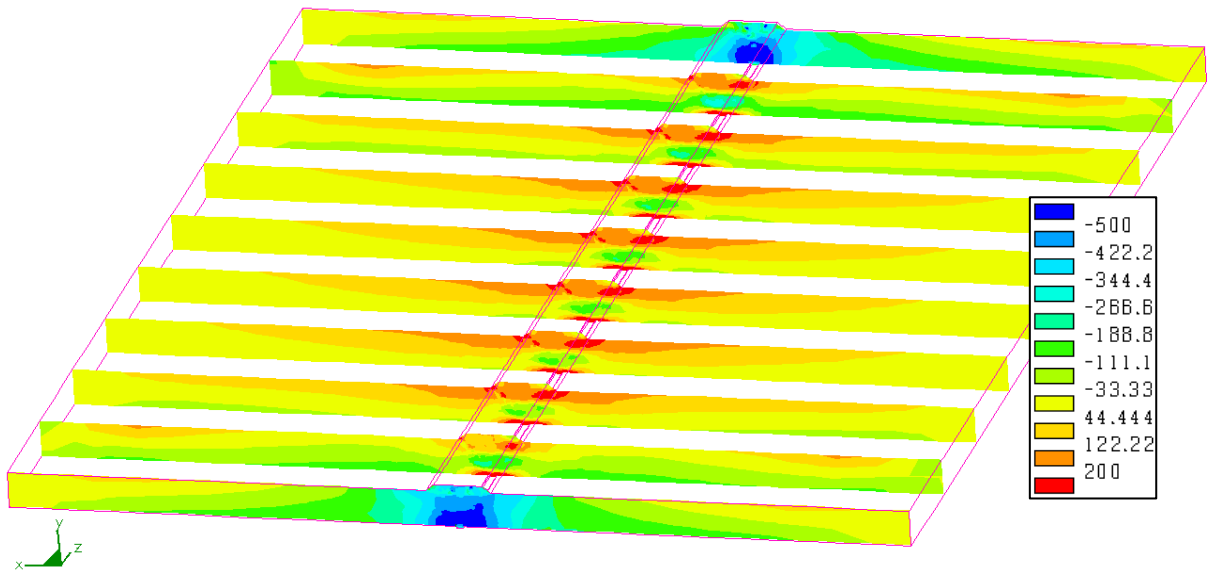
Obr. 7.2.4.9 Porovnání vypočtených průběhů zbytkové napjatosti v podélném směru - horní strana desky



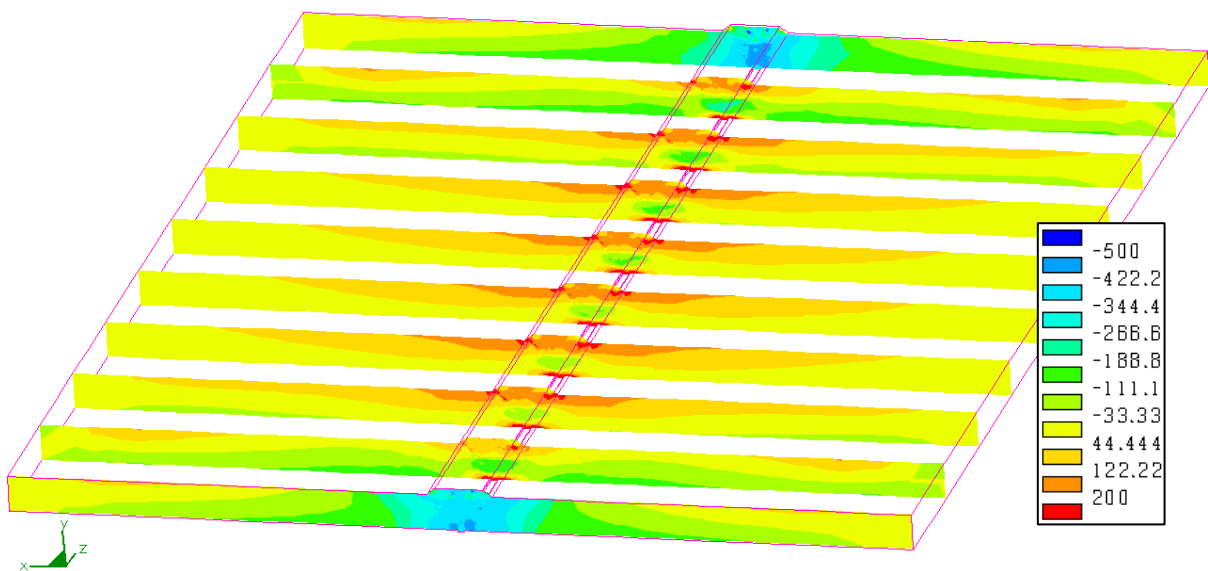
Obr. 7.2.4.10 Porovnání vypočtených průběhů zbytkové napjatosti v podélném směru - uprostřed desky



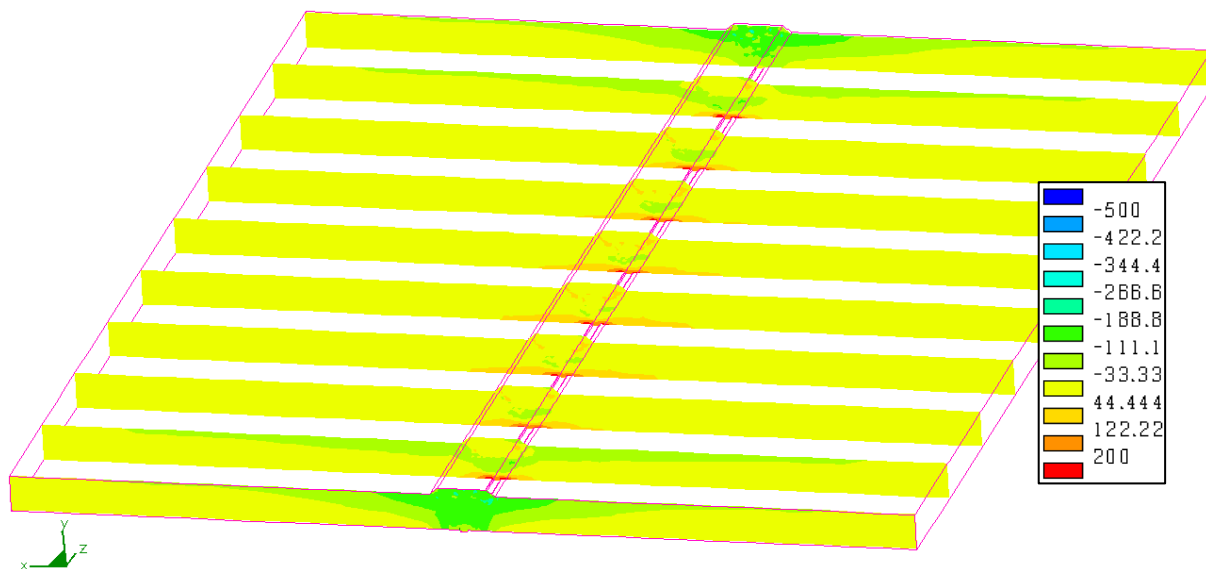
Obr. 7.2.4.11 Porovnání vypočtených průběhů zbytkové napjatosti v podélném směru - spodní strana desky



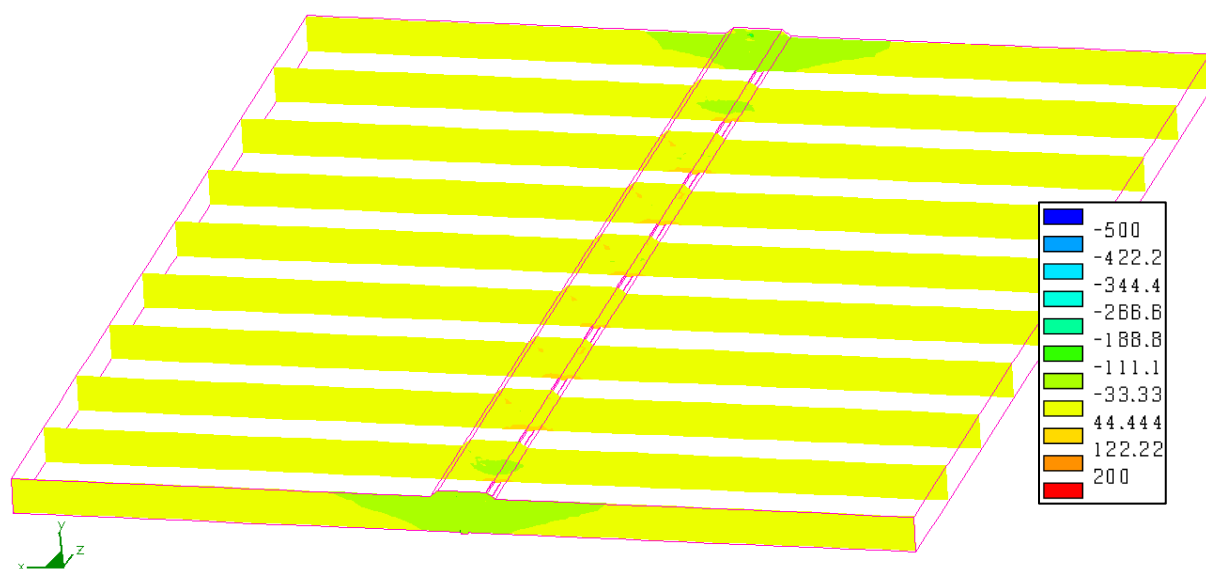
Obr. 7.2.4.12 Zbytková napjatost v příčném směru (osa X) [MPa] po svařování - EP model materiálu



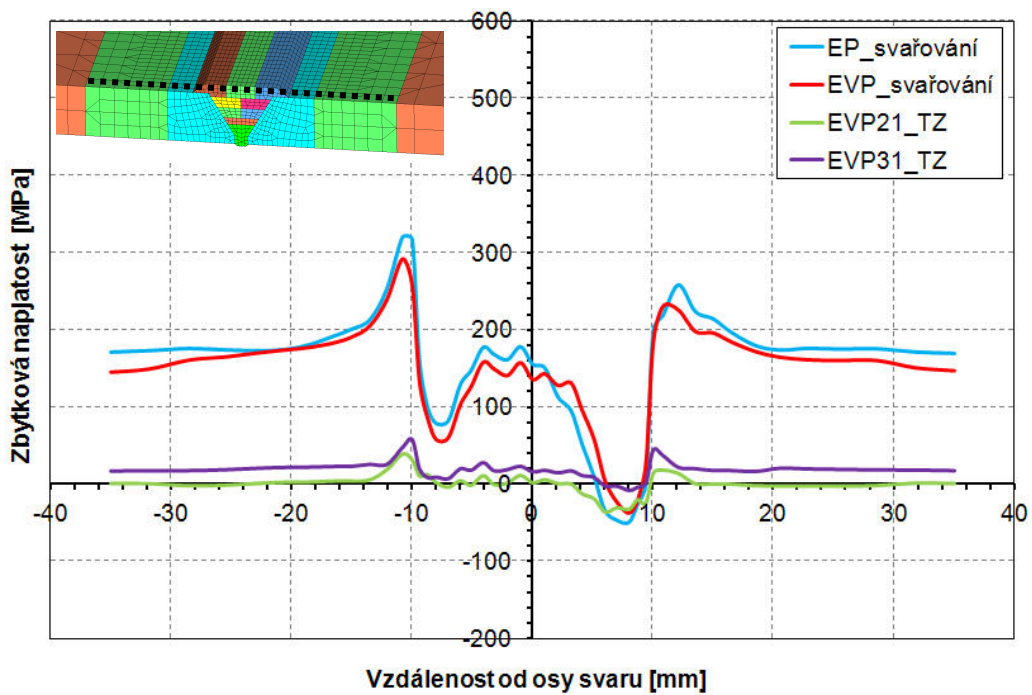
Obr. 7.2.4.13 Zbytková napjatost v příčném směru (osa X) [MPa] po svařování - EVP model materiálu



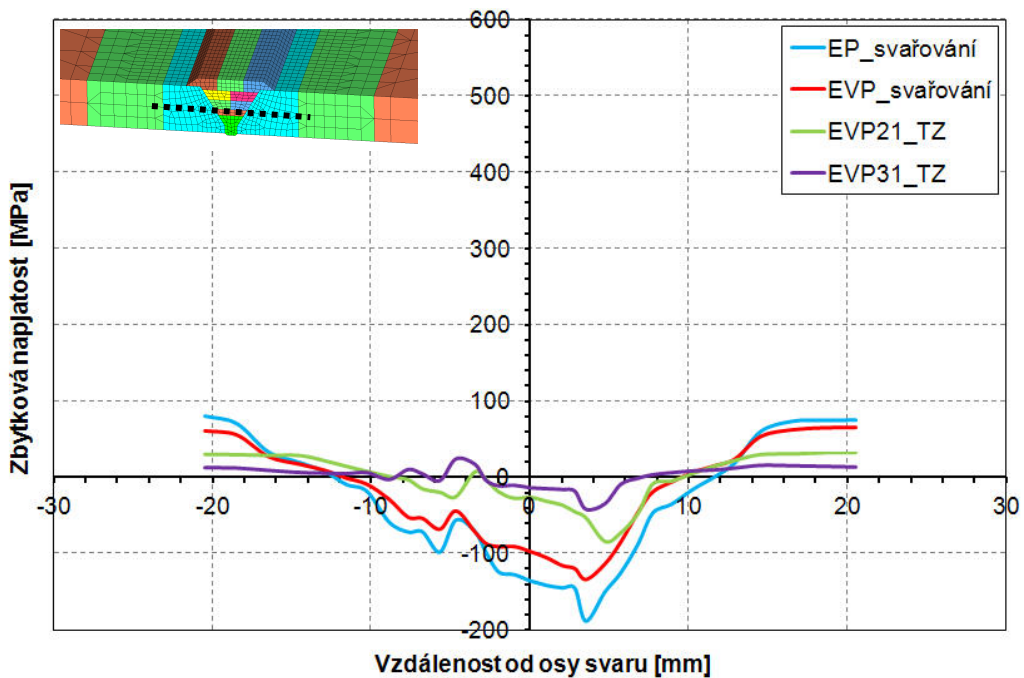
Obr. 7.2.4.14 Zbytková napjatost v příčném směru (osa X) [MPa] po tepelném zpracování - EVP model materiálu č. 21



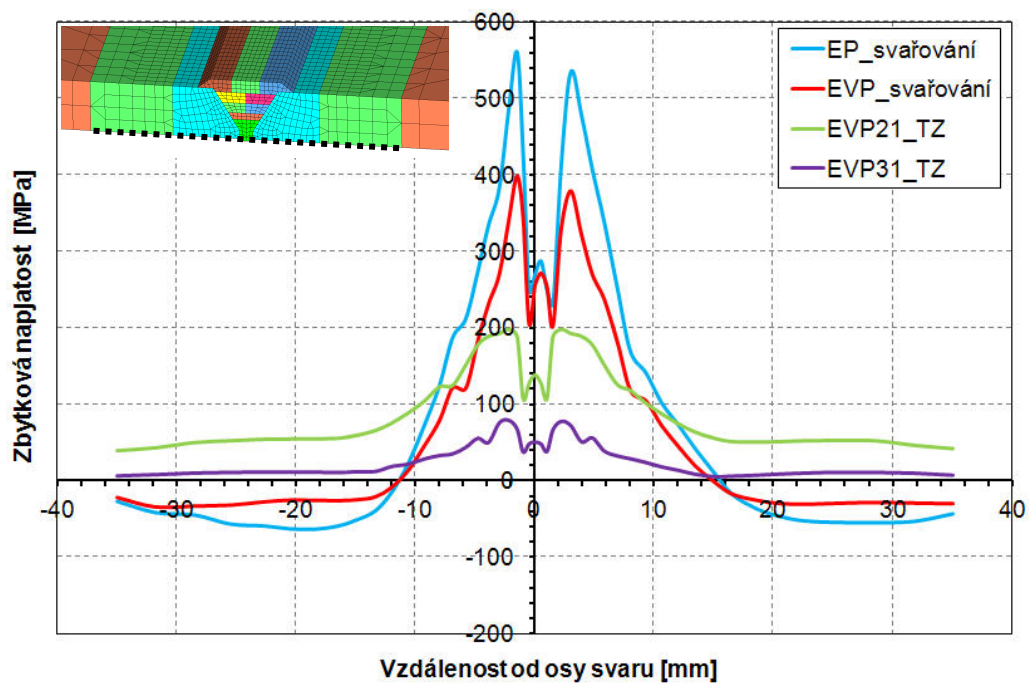
Obr. 7.2.4.15 Zbytková napjatost v příčném směru (osa X) [MPa] po tepelném zpracování - EVP model materiálu č. 31



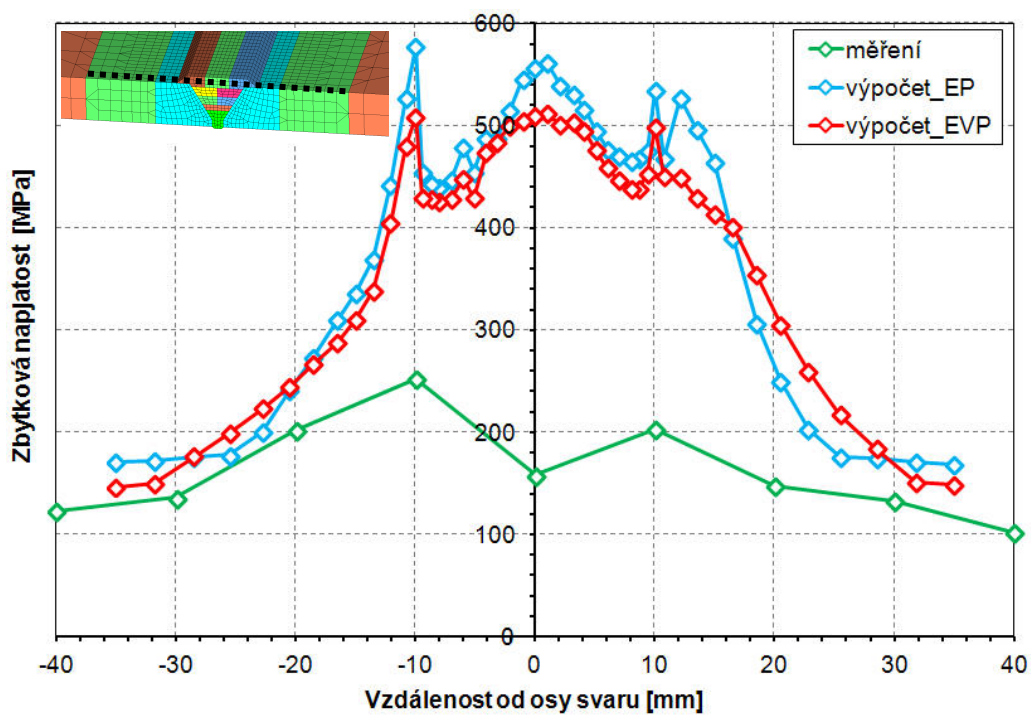
Obr. 7.2.4.16 Porovnání vypočtených průběhů zbytkové napjatosti v příčném směru - horní strana desky



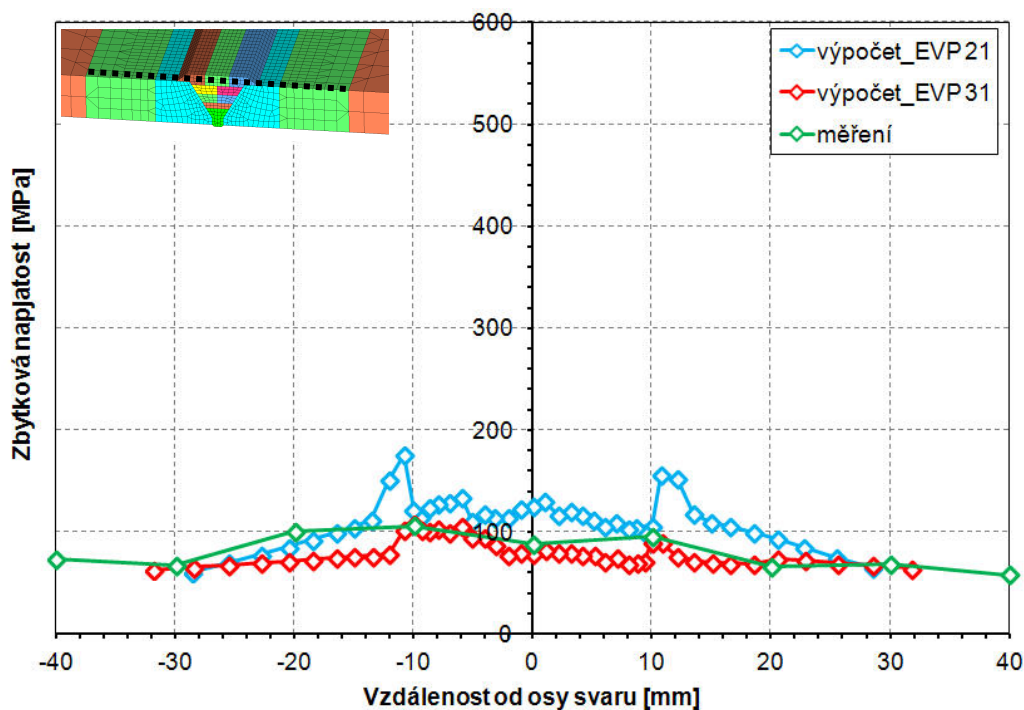
Obr. 7.2.4.17 Porovnání vypočtených průběhů zbytkové napjatosti v příčném směru - uprostřed desky



Obr. 7.2.4.18 Porovnání vypočtených průběhů zbytkové napjatosti v příčném směru - spodní strana desky



Obr. 7.2.4.19 Porovnání měřené a vypočtené maximální hlavní zbytkové napjatosti po svařování - horní strana desky



Obr. 7.2.4.20 Porovnání měřené a vypočtené maximální hlavní zbytkové napjatosti po tepelném zpracování - horní strana desky

7.2.5 Zhodnocení výsledků mechanicko-strukturních analýz

- Z porovnání rozložení vypočtené redukované (nejvíce viditelné rozdíly v barevné škále) (viz **obr. 7.2.4.1 - 7.2.4.4**), podélné (viz **obr. 7.2.4.5 - 7.2.4.8**) i příčné (viz **obr. 7.2.4.12 - 7.2.4.15**) zbytkové napjatosti prezentované pomocí barevné škály v řezech ve směru svařování je patrné, že v případě svařování dochází při použití EVP modelu materiálu k poklesu a částečnému přerozdělení zbytkové napjatosti ve srovnání s použitím EP modelu materiálu. U porovnání výsledků analýz TZ je zřejmé, že použití EVP modelu materiálu č. 21 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.
- Ze vzájemného porovnání průběhů vypočtené podélné (viz **obr. 7.2.4.9 - 7.2.4.11**) a příčné (viz **obr. 7.2.4.16 - 7.2.4.18**) zbytkové napjatosti po svařování, vykreslované vždy na horní straně, uprostřed a na spodní straně desky, je evidentní následující trend. Na horní straně desky, která neprošla tolika teplotními cykly jako prostřední 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 (viz kap. 6)) 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.
- S ohledem na důvody uvedené v kap. 5.1.2 byla pro získání experimentálních výsledků použita magnetoelastická metoda. Tato metoda je na základě [24] chápána jako metoda polokvantitativní (vhodná k vzájemnému relativnímu porovnávání), zejména v případě měření vysokých hodnot zbytkových napětí po svařování (se zvyšující se napjatostí roste chyba měření ve smyslu absolutních hodnot). V případě měření zbytkové napjatosti po TZ (nízká úroveň zbytkové napjatosti) ji lze považovat za dostatečně věrohodnou. Vzhledem k výše uvedenému lze konstatovat následující. V případě svařování (viz **obr. 7.2.4.19**) 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 (zejména ve svaru a v TOO).

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 (několika násobný tepelný cyklus), kde by byl rozdíl patrnější. V případě tepelného zpracování (viz **obr. 7.2.4.20**) 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 by bylo dobré provést ještě další sérii experimentálních verifikačních měření nejlépe pomocí neutronové difrakce.

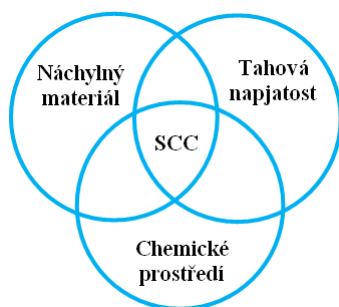
- Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly (7.2), verifikací vypočtených výsledků lze chápat také porovnání s trendem výpočtů, které se provádějí ve světě. Publikace [1] uvádí, že EVP model materiálu by měl být přínosný zejména v případě vícevrstvého svařování. Výsledky v této práci se s tímto tvrzením 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] (jedná se o společnost zabývající se výpočty pro JE v USA) uvádí, že na základě mnoha výpočtů a experimentálních 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 (od určité hodnoty plastického přetvoření se již nezvyšují hodnoty napětí - "umělé oříznutí"). Aplikace EVP modelu materiálu vede k velice podobnému efektu a to přirozenou cestou zohlednění relaxačních resp. creepových procesů. To znamená, že tendenčně se oba přístupy shodují (snaží se snížit nereálně vysokou predikovanou zbytkovou napjatost).

7.3 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.

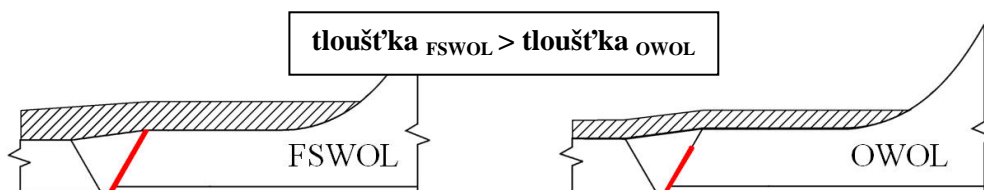
7.3.1 Stručný popis metody WOL a její aplikace v rámci českých JE

Metoda WOL (podrobně popsána v [47]) je primárně chápána jako technologie opravy HSS (vytvoření návaru na vnějším průměru HSS a přilehlém potrubí) vyrobených z materiálů (např. austenitické oceli) náchylných na korozní praskání pod napětím (SCC). Základní příčiny vzniku SCC jsou schematicky znázorněny na **obr. 7.3.1.1**. Tyto tři faktory se navzájem ovlivňují. Pokud dojde ke spolupůsobení všech tří uvedených faktorů, stává se HSS náchylným ke vzniku SCC. Pokud se ovšem podaří odstranit nebo snížit vliv jednoho ze tří faktorů, lze dosáhnout úplného zastavení nebo výrazného snížení růstu již objevených vad v HSS.



Obr. 7.3.1.1 Faktory ovlivňující SCC

A právě metoda WOL je schopná následujícím způsobem eliminovat faktor tahové zbytkové napjatosti. Navařením návaru WOL (o požadovaných rozměrech) se jednak vytvoří nová tlaková bariéra potrubí, ale především dojde v HSS k přerozdělení zbytkové napjatosti. Cílem je vytvoření tlakové zbytkové napjatosti v kořeni HSS, resp. v oblasti náchylné na SCC (zamezení vzniku iniciace vady mechanismem SCC) a dále po tloušťce HSS (zamezení nebo zpomalení růstu vady mechanismem SCC). Metoda WOL má dvě hlavní funkce. V prvním případě jde o zmírnění vlivu SCC u HSS, kde ještě nebyla objevena vada (preventivní funkce). V druhém případě slouží k opravě HSS s již zjištěnou vadou. V obou výše zmíněných případech lze aplikovat buď návaru typu "plný návar" tzv. FSWOL uvedený na **obr. 7.3.1.2** vlevo (vada přes celou původní tloušťku HSS) nebo "optimalizovaný návar" tzv. OWOL uvedený na **obr. 7.3.1.2** vpravo (vada max. do 75 % původní tloušťky HSS).



Obr. 7.3.1.2 Schematické znázornění návaru typu FSWOL (vlevo) a OWOL (vpravo)

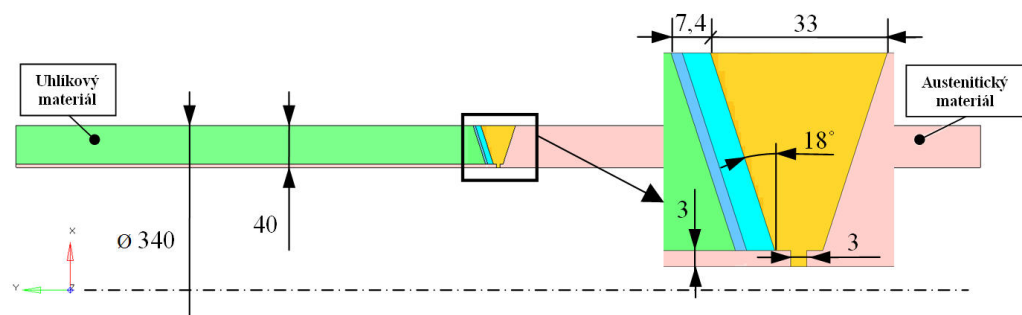
Aby bylo možné prakticky metodu WOL aplikovat, musí být vždy prokázána její účinnost vzhledem ke konkrétnímu HSS na JE. Přesně řečeno, je vždy nutné navrhnout takové rozměry návaru WOL (výška, šířka), aby byly splněny podmínky uvedené v předchozím odstavci. Rozměry návaru WOL se stanoví na základě výpočtových analýz zahrnující např. statické posouzení, výpočet zbytkové napjatosti, lomově-mechanické posouzení (růst skutečné nebo postulované vady vlivem únavy a SCC) atd. Po té, co navržené rozměry návaru WOL vyhovují všem kritériím plynoucích z výpočtových analýz, je lze považovat za finální.

Cílem ÚAM Brno ve výše diskutované části projektu VaV je vytvořit obecnou 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.

Vzhledem k značnému rozsahu provedených prací v rámci výpočtového posouzení metody WOL budou dále stručně uvedeny nejprve nejdůležitější výpočtové předpoklady (kap. 7.3.2) nezbytné pro pochopení výsledků analýz a dále bude uvedeno porovnání výsledků numerických analýz svařování (kap. 7.3.3 a 7.3.4), kde byly použity EP a EVP m. m. Podrobný popis a kompletní výsledky numerických analýz svařování, provedených v rámci WOL (analyzováno několik typových HSS), jsou součástí technických zpráv [48, 49, 50].

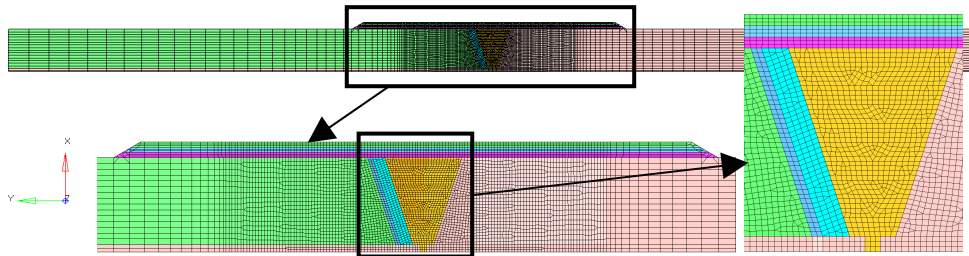
7.3.2 Výpočtové předpoklady

- Řešení numerických analýz svařování bylo provedeno pomocí 2D axisymetrických úloh (ověřena použitelnost porovnáním s 3D) s nepohybujícím se tepelným zdrojem pomocí metody MBD za předpokladů uvedených v [49]. Byly uvažovány standardní svařovací parametry a postupy svařování odpovídající dané svařovací technologii. V analýzách byl uvažován EP (izotropní zpevnění) a EVP model materiálu.
- Pro provedení numerických analýz svařování byl zvolen HSS nátrubku havarijního dochlazování reaktoru (RE) (viz obr. 7.3.2.1).
- Konkrétní geometrie nátrubku s HSS byla převedena na případ rovného potrubí při zachování průměrů a tloušťky stěny. To znamená, že ve fázi tvorby obecné metodiky není posuzován vliv konkrétní geometrie HSS, ale pouze vliv jeho průměrů a tloušťky stěny.



Obr. 7.3.2.1 Geometrie a topologie HSS nátrubku havarijního dochlazování RE [mm]

- Výpočtový model uvedený na **obr. 7.3.2.2** je vytvořený v programu Hypermesh V 11.0. Průměrná velikost prvků použitých v oblasti svaru a TOO je $1 \div 2$ mm. Ve výpočtovém modelu bylo uvažováno 50 svarových housenek pro HSS a 121 svarových housenek pro návar WOL. Na základě prvotního návrhu rozměrů WOL dle [49] byl uvažován návar typu OWOL o rozměrech výška 6,6 mm a šířka 260 mm.

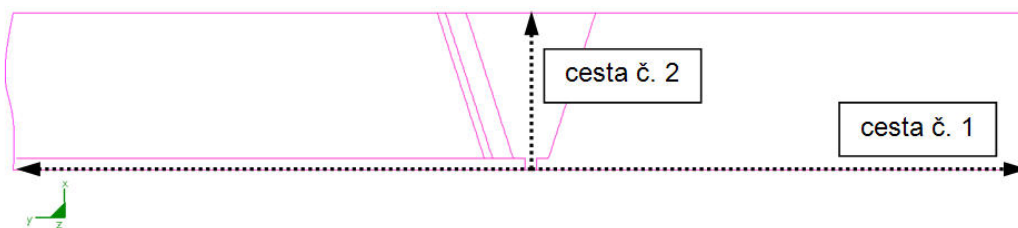


Obr. 7.3.2.2 Výpočtový model HSS nátrubku havarijního dochlazování RE

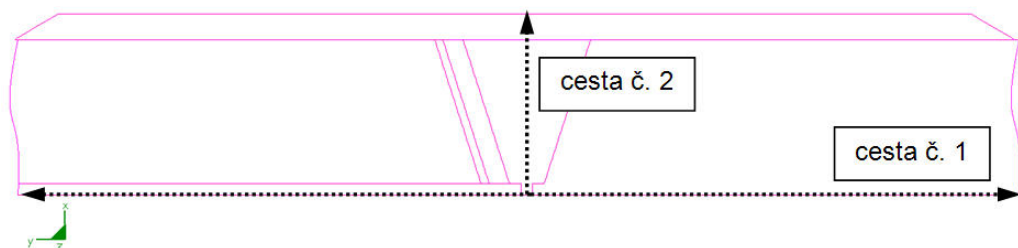
- Byly uvažovány následující teplotní a mechanické okrajové podmínky. Teplotní - ve fázi svařování bylo pro každou svarovou housenku uvažováno "držení" teploty 1600°C po dobu 15 s v souladu s požadavky metodiky MBD; odvod tepla z vnějších ploch byl definován přestupem tepla kombinací konvekce a radiace pro materiálového rozhraní ocel - vzduch dle **obr. 6.1.2**; ve fázi simulace "njetí" na provozní teplotu byla použita teplota v 297°C . Mechanické - zamezení posuvů v ose X a Y jednoho konce výpočtového modelu; ve fázi simulace zatížení provozním přetlakem byl použit přetlak $12,3$ MPa a příslušná osová síla vyvolaná přetlakem.
- EP a EVP vlastnosti materiálů uvažovaných v numerických analýzách svařování jsou uvedeny v [48]. V analýzách budou tyto materiály reprezentovat následující části HSS. Materiál 22K - uhlíkový základní materiál (zelená barva), 08Ch18N10T - austenitický základní materiál (růžová barva) a EA 400/10T - austenitický svarový kov (písková barva) + vrstvy přechodových návarů (modrá barva) + návar WOL.
- Konečný návrh rozměrů návaru WOL z pohledu numerických analýz svařování se získá v souladu s [47] v rámci iteračního procesu popsaného v bodech 1), 2), 3). Simulovaná oprava metodou WOL byla ve fázi tvorby obecné metodiky uvažována jako preventivní.
 - 1) Fáze PreWOL - provedení výpočtu stavu před aplikací návaru WOL při provozní teplotě. Tato část výpočtu zahrnuje simulaci svařování výplně HSS ve výrobě (zbytková napjatost po výrobě), 1x tlakovou zkoušku a následné zatížení HSS příslušnou provozní teplotou. Výsledkem je zbytková napjatost dosahující obecných hodnot a průběhů ve smyslu tah, tlak v posuzované oblasti HSS. Posuzovanou oblastí HSS se myslí oblast na vnitřním průměru, náchylná na SCC. Velikost posuzované oblasti se rovná součtu šířky svaru a přechodových návarů na vnitřním průměru HSS.
 - 2) Fáze PostWOL - provedení výpočtu stavu po aplikaci návaru WOL při provozní teplotě. Simulace svařování návaru WOL s následným zatížením HSS příslušnou provozní teplotou. Zbytková napjatost v axiálním i v obvodovém směru musí v posuzované oblasti dosahovat pouze tlakových hodnot. Z hlediska výpočtů to znamená, že se nejprve použijí menší rozměry návaru typu OWOL a pokud není

dosaženo předepsaného napěťového stavu pro fázi PostWOL, pokračuje se postupným navařováním dalších svarových vrstev maximálně však do větších rozměrů návaru typu FSWOL.

- 3) Fáze PostWOL+PZ - provedení výpočtu stavu PostWOL při provozním mechanickém zatížení (přetlak, silové účinky od připojeného potrubí, atd.). Zbytková napjatost v axiálním i v obvodovém směru musí v posuzované oblasti dosahovat nejvýše hodnoty cca 70 MPa v tahu. Tato hodnota zaručuje významné snížení pravděpodobnosti vzniku iniciace vady mechanismem SCC.
- Výsledky numerických analýz svařování získané v bodě 3) slouží jako vstup do lomově-mechanického posouzení růstu vady mechanismem SCC [51].
 - Výsledky numerických analýz svařování při 20°C (po svařování a vychladnutí) ve stavu před navařením (výroba HSS) a po navaření návaru WOL slouží jako vstup do lomově-mechanického posouzení únavového růstu vady [51].
 - Na **obr. 7.3.2.3** (před navařením návaru WOL) a **obr. 7.3.2.4** (po navaření návaru WOL) jsou vždy znázorněny pro vykreslení a porovnání průběhů axiální a obvodové zbytkové napjatosti za předpokladu použití EP a EVP modelu materiálu dvě cesty č. 1 a č. 2. Cesta č. 1 reprezentuje průběh zbytkové napjatosti na ID (oblast náchylná na SCC) od osy svaru směrem ke koncům potrubí. Na cestě č. 2 je vykreslen průběh zbytkové napjatosti přes tloušťku stěny potrubí (před navařením návaru WOL) a návaru WOL (po navaření návaru WOL) s počátkem na ID. Cesta č. 2 byla zvolena obecně uprostřed HSS.
 - Výsledky mechanických analýz s ohledem na SCC (viz kap. 7.3.3) jsou vždy vykreslovány na cestě č. 1 a 2 ve fázi PreWOL, PostWOL a PostWOL+PZ. Výsledky mechanických analýz s ohledem na únavu materiálu (viz kap. 7.3.4) jsou vždy vykresleny pouze na cestě č. 2 před a po navaření návaru WOL při teplotě 20°C.



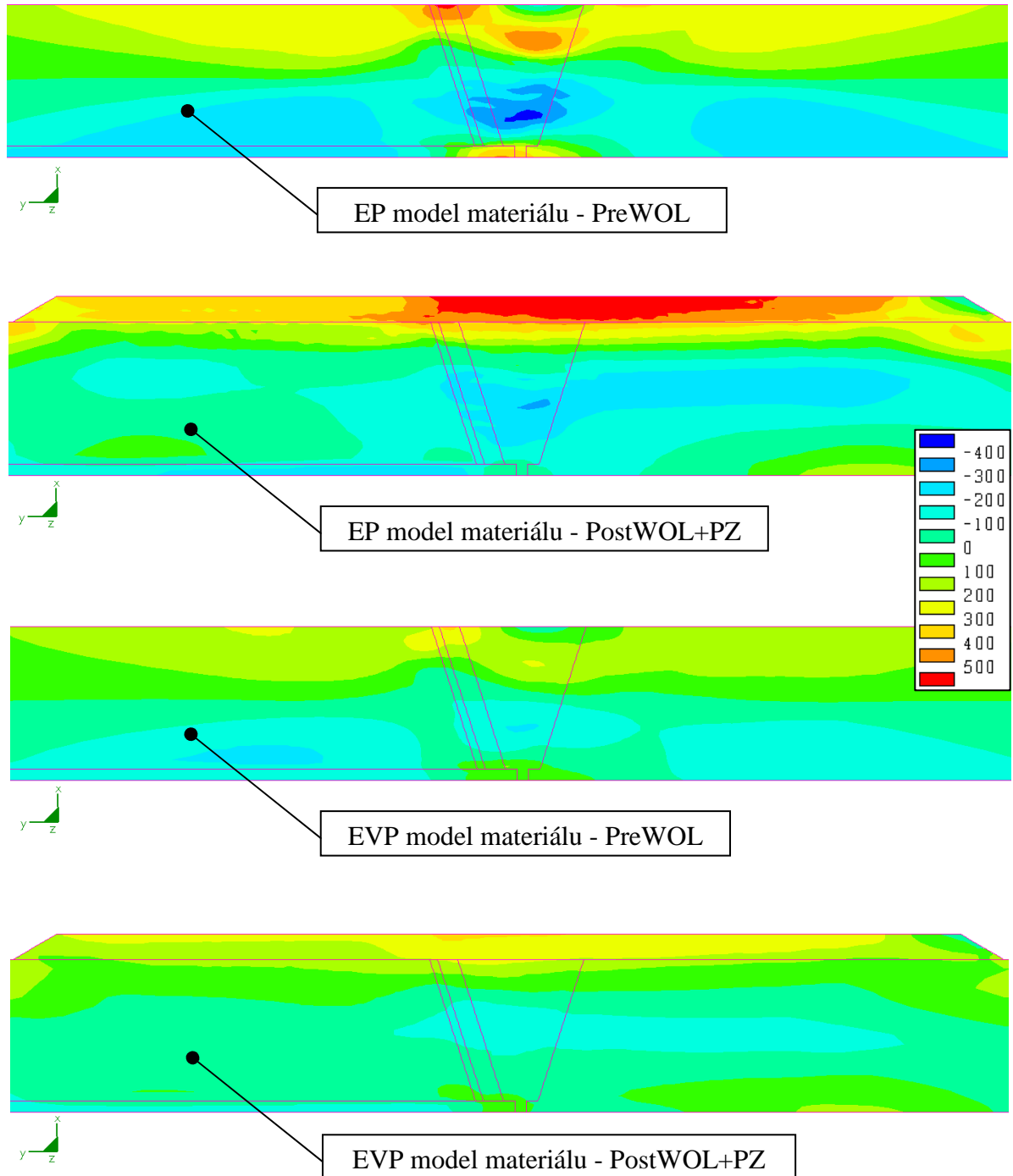
Obr. 7.3.2.3 Vyznačení cest pro vykreslení průběhů zbytkové napjatosti - před navařením návaru WOL



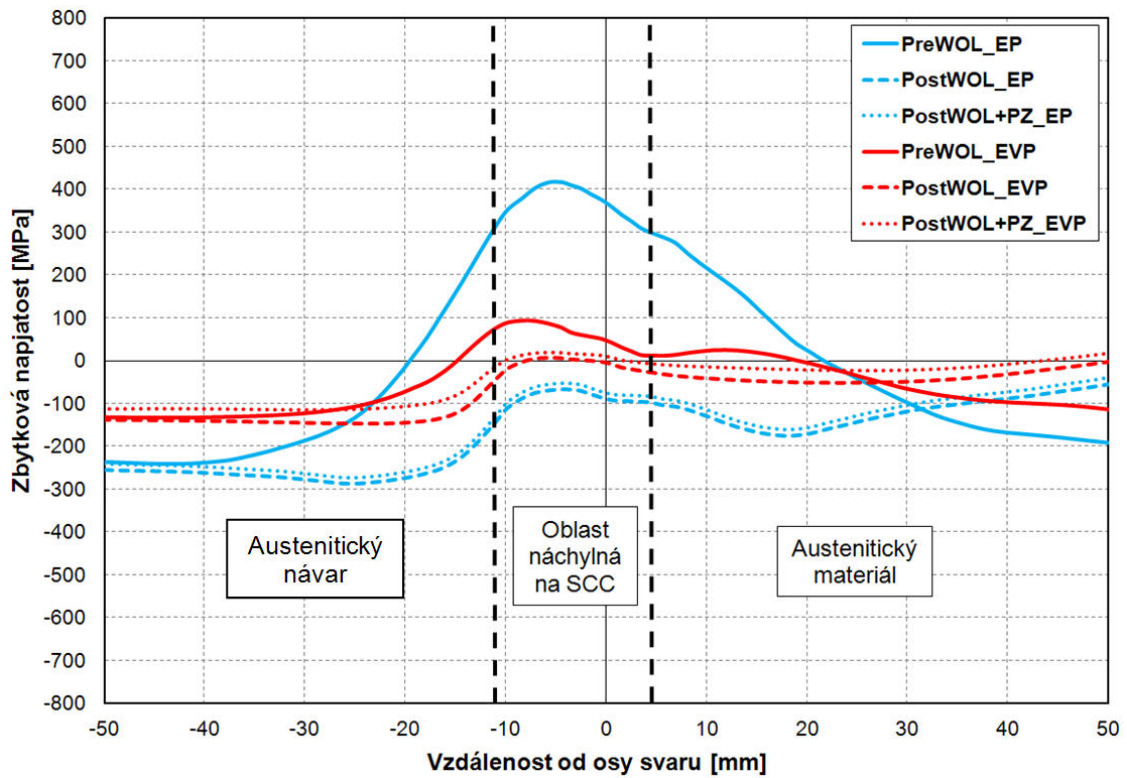
Obr. 7.3.2.4 Vyznačení cest pro vykreslení průběhů zbytkové napjatosti - po navaření návaru WOL

7.3.3 Výsledky mechanicko-strukturálních analýz s ohledem na SCC

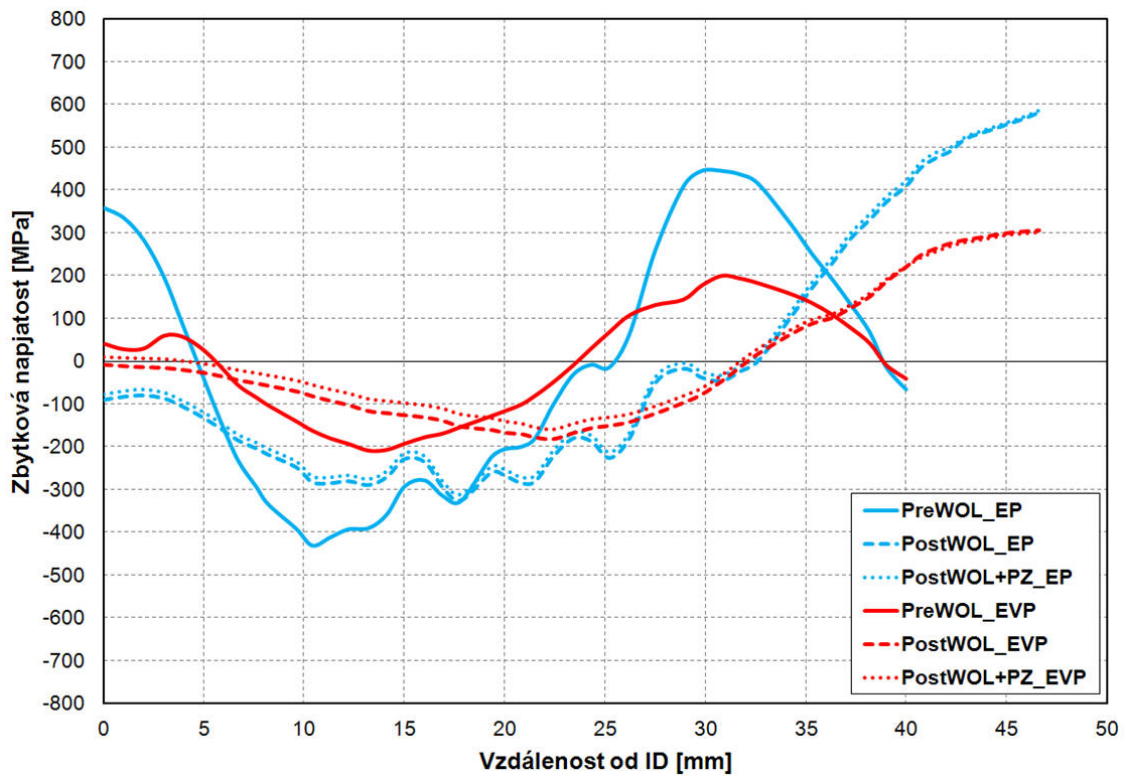
Výsledky a vzájemné porovnání průběhů zbytkové napjatosti, ve vztahu k hodnocení SCC [48], reprezentují obr. 7.3.3.1 až obr. 7.3.3.6. Ve fázi PreWOL je uvažováno zatížení provozní teplotou $T = 297^{\circ}\text{C}$ a u PostWOL+PZ je uvažováno zatížení totožnou provozní teplotou spolu s provozním tlakem $p = 12,3\text{ MPa}$.



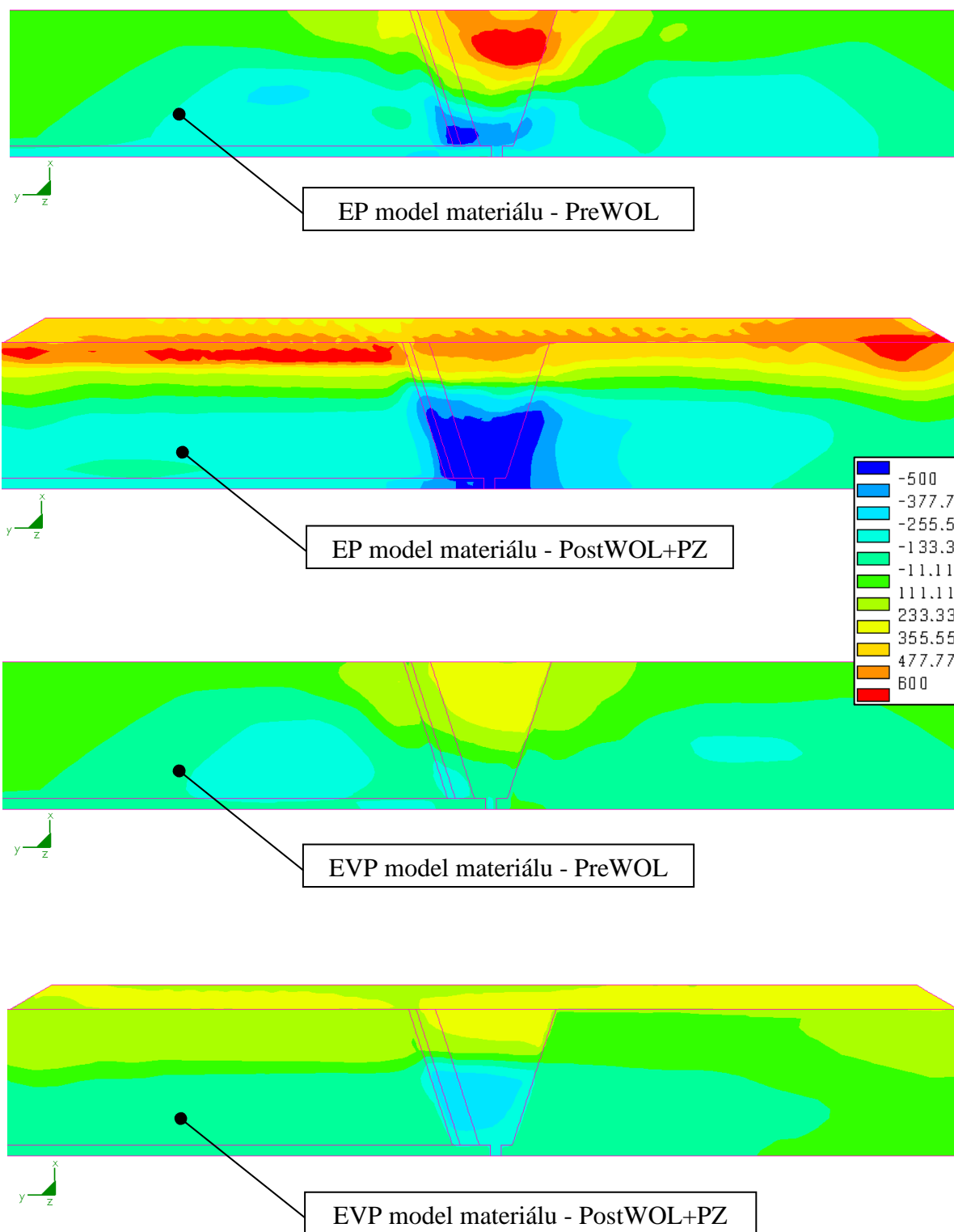
Obr. 7.3.3.1 Zbytková napjatost [MPa] v axiálním směru



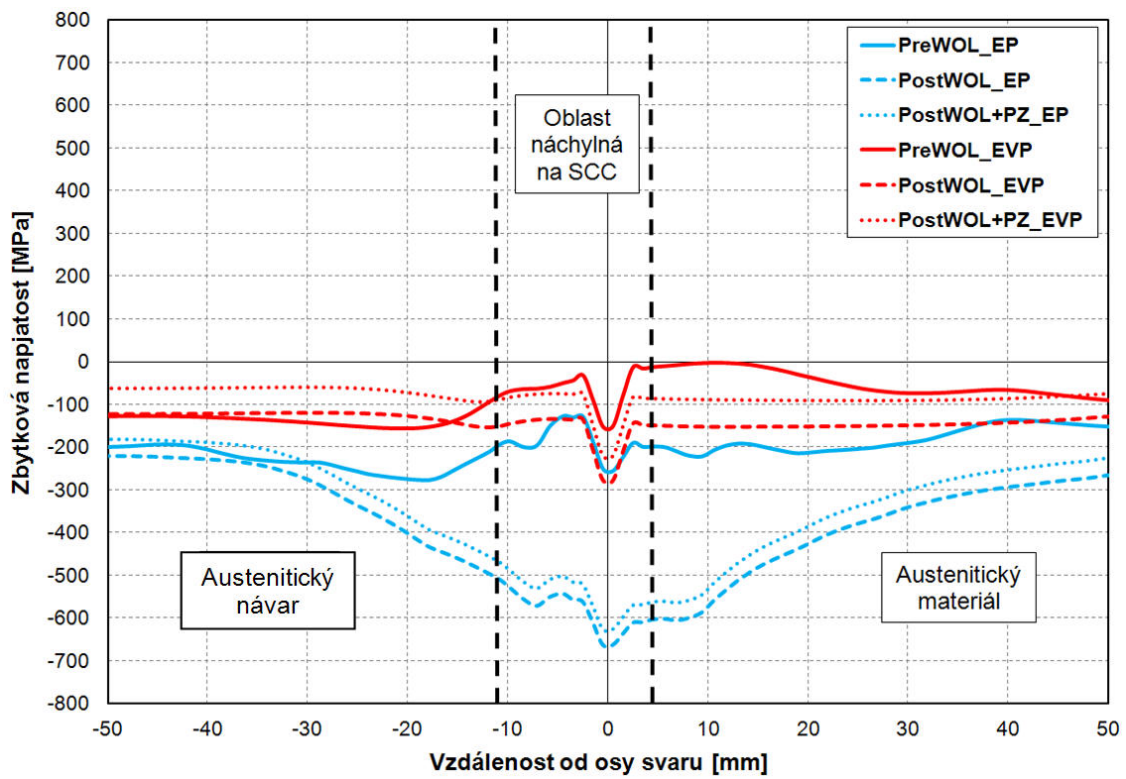
Obr. 7.3.3.2 Zbytková napjatost v axiálním směru - cesta č. 1



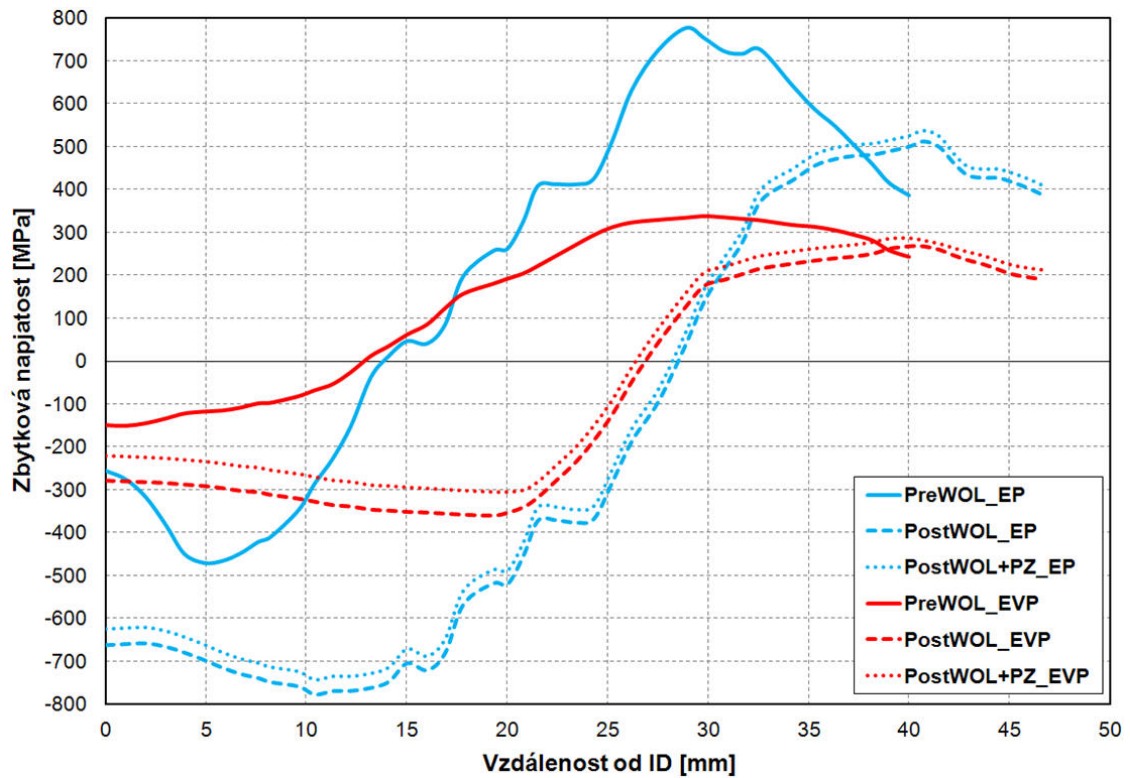
Obr. 7.3.3.3 Zbytková napjatost v axiálním směru - cesta č. 2



Obr. 7.3.3.4 Zbytková napjatost [MPa] v obvodovém směru



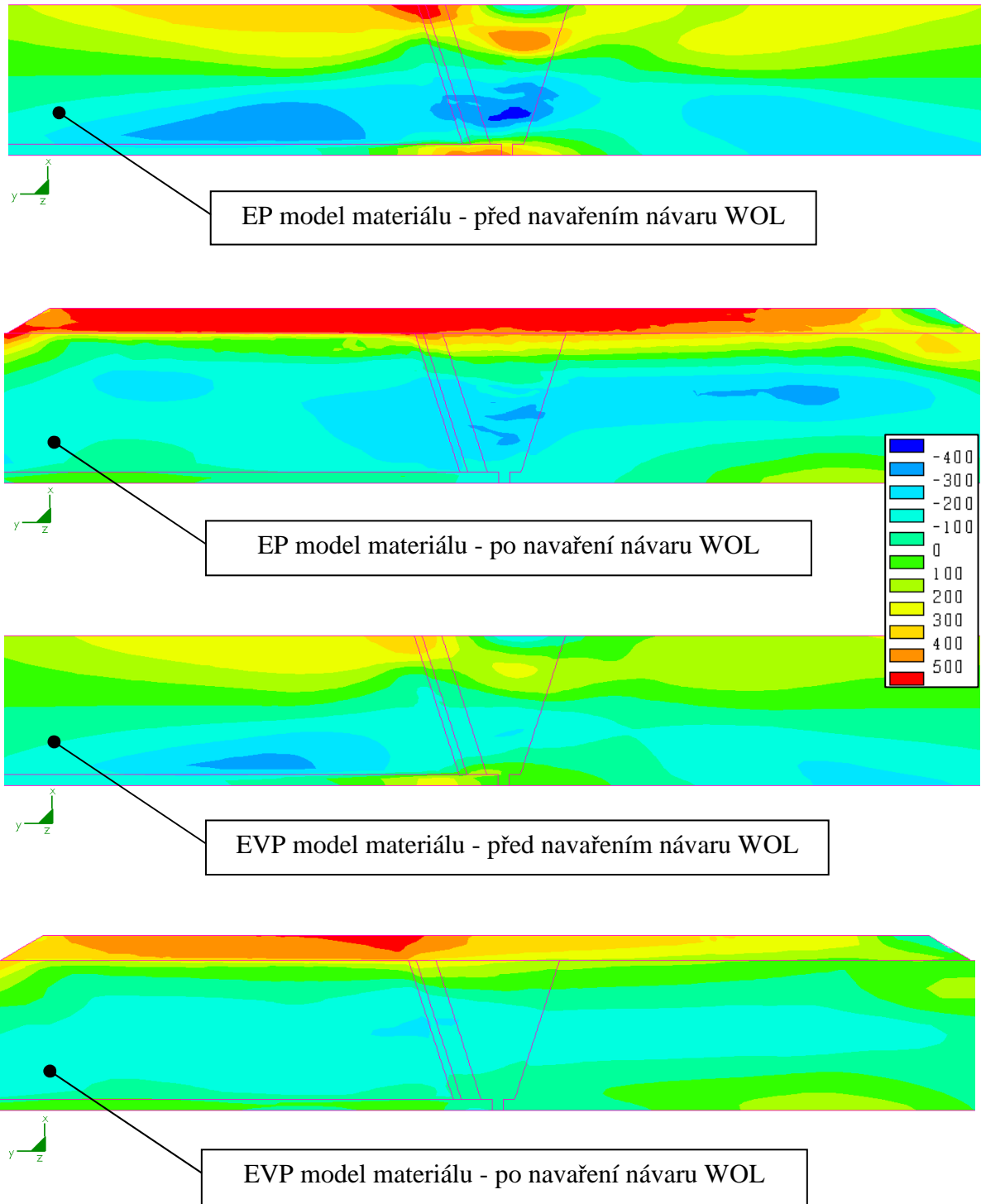
Obr. 7.3.3.5 Zbytková napjatost v obvodovém směru - cesta č. 1



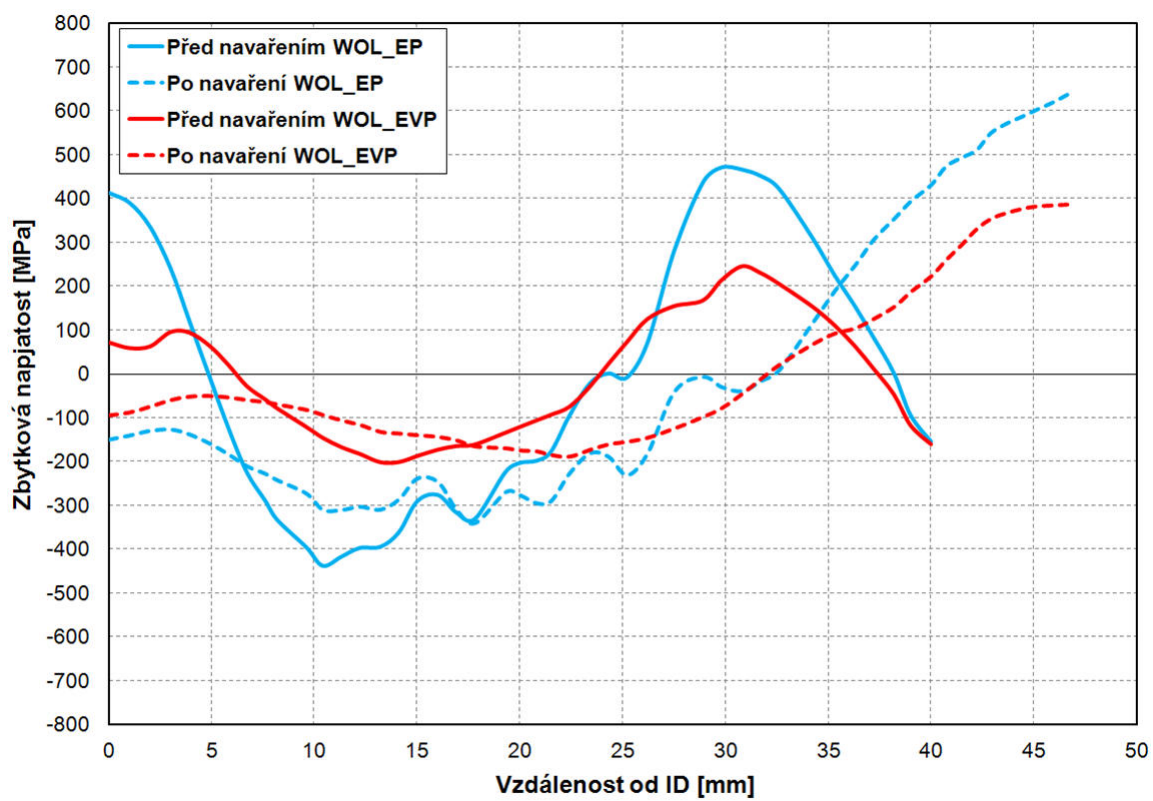
Obr. 7.3.3.6 Zbytková napjatost v obvodovém směru - cesta č. 2

7.3.4 Výsledky mechanicko-strukturních analýz s ohledem na únavu materiálu

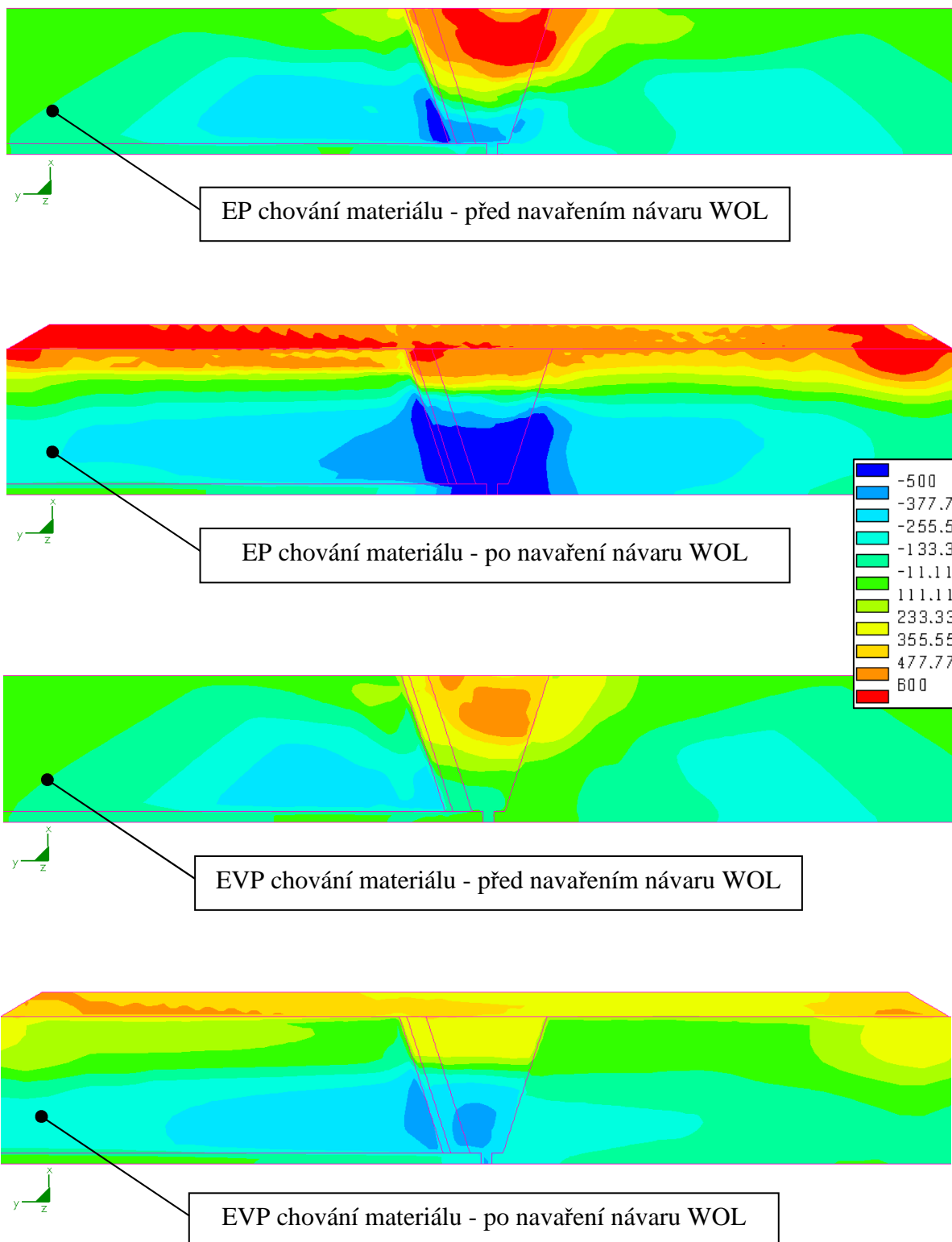
Výsledky a vzájemné porovnání průběhů zbytkové napjatosti [MPa], ve vztahu k hodnocení únavového růstu vady [48], reprezentují **obr. 7.3.4.1** až **obr. 7.3.4.4**. Zbytková napjatost před i po navaření návaru WOL je vykreslována při teplotě $T = 20^\circ\text{C}$.



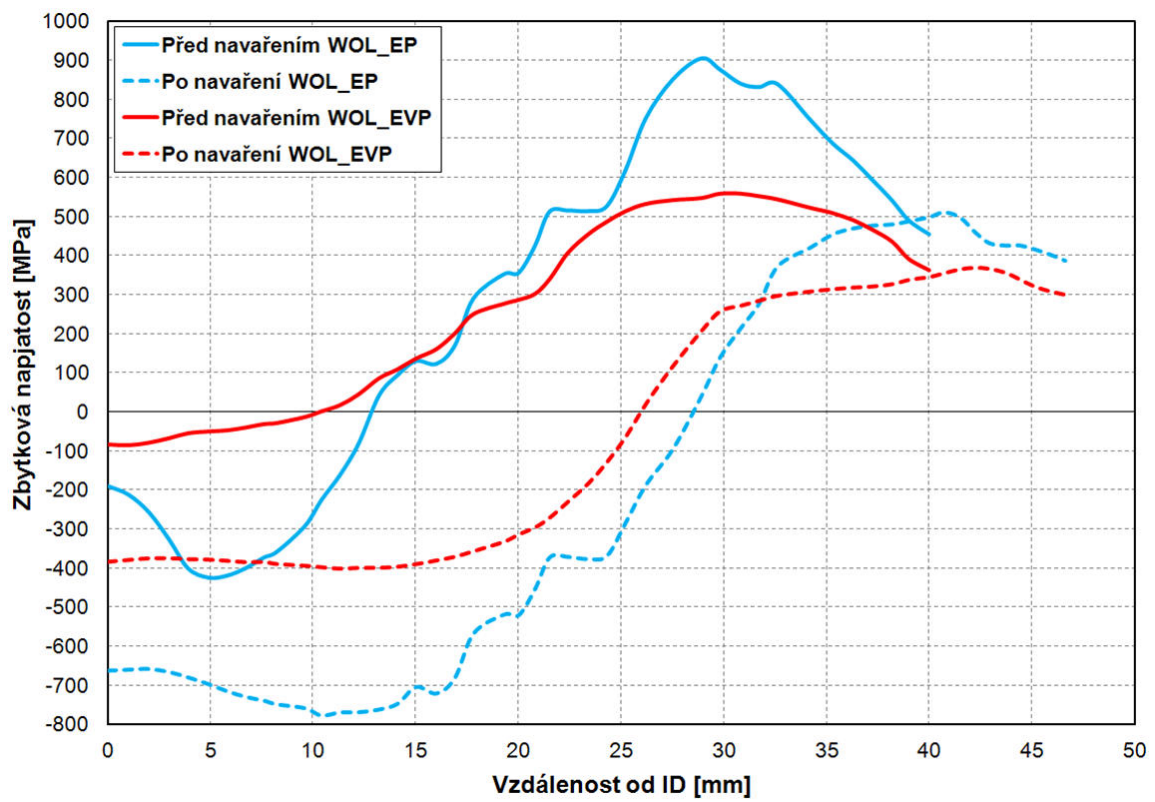
Obr. 7.3.4.1 Zbytková napjatost [MPa] v axiálním směru



Obr. 7.3.4.2 Zbytková napjatost v axiálním směru - cesta č. 2



Obr. 7.3.4.3 Zbytková napjatost [MPa] v obvodovém směru



Obr. 7.3.4.4 Zbytková napjatost v obvodovém směru - cesta č. 2

7.3.5 Zhodnocení výsledků mechanicko-strukturních analýz

- Z výsledků uvedených v kapitolách 7.3.3 a 7.3.4 lze obecně konstatovat, že při použití EVP modelu materiálu jsou průběhy zbytkové napjatosti kvalitativně podobné průběhům zbytkové napjatosti při použití EP modelu materiálu, ale kvantitativně dosahují nižších hodnot. Ale právě úroveň (hodnota) zbytkové napjatosti v daném místě rozhoduje o účinnosti návaru WOL.
- Praktický dopad použití EVP modelu materiálu (v rámci analýz svařování) na výsledné rozměry návaru WOL je následující. Například na **obr. 7.3.3.2 a 7.3.3.3** jsou vykresleny průběhy zbytkové napjatosti pro jednotlivé fáze PreWOL, PostWOL a PostWOL+PZ. Rozhodující pro zhodnocení účinnosti návaru WOL, vzhledem k SCC, jsou hodnoty zbytkové napjatosti v oblasti náchylné na SCC (oblast kořene svaru a TOO na ID) zejména ve fázi PostWOL+PZ. Jak je z výše uvedených obrázků patrné, v případě použití EP modelu materiálu dosahuje zbytková napjatost 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 (pod touto hodnotou by nemělo dojít k iniciaci vady). 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. Například na **obr. 7.3.4.2 a 7.3.4.4** jsou uvedeny průběhy zbytkové napjatosti po tloušťce HSS před a po navaření návaru WOL. Rozhodující pro zhodnocení účinnosti návaru WOL z hlediska možného 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*původní tloušťky HSS (ve smyslu od ID k OD) v případě návaru typu OWOL a 0,75*původní tloušťky HSS u návaru typu FSWOL. Na uvedených obrázcích je patrné, že 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 (přibližně oblast, kde je provádění NDT obtížné - 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 ještě 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 zapotřebí měnit rozměry návaru WOL. To je v porovnání s EVP výpočtovým přístupem na straně nebezpečné. Přibližně v druhé polovině tl. HSS, respektive v oblasti, kde se již snadněji provádí NDT, jsou z pohledu lomové mechaniky konzervativnější výsledky EP výpočtového přístupu. Ovšem tato oblast není tak zásadní pro hodnocení účinnosti návaru WOL jako oblast, kde je provádění NDT obtížné (cca první polovina tl. HSS). Podrobné informace týkající se použití výše uvedených výsledků numerických analýz svařování v rámci následného lomově-mechanického výpočtového posouzení je uvedeno v [51].

- Jak již bylo několikrát zmíněno, ani v dnešní době není snadné experimentálně verifikovat konkrétní hodnoty zbytkové napjatosti po svařování. Spolu s malým množstvím dostupných opravdu kvalitních porovnání výpočtové a experimentální predikce není stoprocentně možné potvrdit, který výpočtový přístup je určitě na straně bezpečné ve všech posuzovaných místech. Proto do doby než bude kvalitními pracemi v oblasti porovnání experimentu a výpočtu prokázáno, který výpočtový přístup koresponduje s reálnými podmínkami svařování (i když již nyní literatura [1, 4, 20, 46] přímo i nepřímo uvádí, že blíže reálným podmínkám svařování by měl být EVP model materiálu), budou výsledky z obou výpočtových přístupů kombinovány podle metody navržené na ÚAM Brno. Podrobnější informace jsou uvedeny v [51].
- 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.

8 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 (více viz kap. 2.1). 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 (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 dostatečně použítí 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 dle kap. 7.1.2 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 (viz kap 7.2.4) je evidentní následující trend. Na horní straně desky, která neprošla tolika teplotními cykly jako prostředek a spodní část desky (menší počet napět'ově-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 mezí kluzu. Při použití EVP modelu materiálu se pohybují (vzhledem k hodnotám meze kluzu použitých materiálů (viz kap. 6)) 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 kap. 5.1.2 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 (viz kap. 7.2.4), 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 (viz kap. 7.2.4). 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 na začátku kapitoly 7.2, 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 tendence 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. Například v kap. 7.3.3 jsou vykresleny průběhy zbytkové napjatosti pro jednotlivé fáze PreWOL, PostWOL a PostWOL+PZ. 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. Například v kap. 7.3.4 jsou uvedeny průběhy zbytkové napjatosti po tloušťce HSS před a po navaření návaru WOL. 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*původní tloušťky HSS (ve smyslu od ID k OD) v případě návaru typu OWOL a 0,75*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.

9 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 použitým 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.

10 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 (Fe_3Al), 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 skříňe 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 prezentaion, 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] ŠVAŘÍČEK, K.: Využití numerických simulací a neuronových sítí ke zdokonalení odvrťovací 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.: Reziiduální 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 - Výzkumný 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 zkratek

Zkratka	Význam
TZ	Tepelné zpracování
EP	Elasto-plastický
EVP	Elasto-viskoplastický
ÚAM Brno	Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o.
IAM Brno	Institute of applied mechanics Brno, Ltd.
MKP	Metoda konečných prvků
SYSWELD	Programový soubor pro numerické analýzy MKP
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
RTG	Rentgen
RRT	Round robin test
SAW	Submerged arc welding (technologie svařování pod tavidlem)
EBW	Electron beam welding (technologie svařování svazkem elektronů)
LBW	Laser beam welding (technologie svařování laserem)
MAG	Metal active gas (technologie obloukového svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu)
TIG	Tungsten inert gas (technologie svařování netavící se elektrodou s inertním plynem)
MMAW	Manual metal arc welding (ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou)
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
IRA	Izotermický rozpad austenitu
MBD	Macro bead deposit (metoda řešení teplotní části numerických analýz svařování pomocí tzv. makroelementů)
VŠB TUO	Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava
ÚFM AVČR	Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky
ÚJV Řež	Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.
ÚJF AVČR	Ústav jaderné fyziky Akademie věd České republiky
ZM	Základní materiál
SM	Svarový materiál
OP	Okrajová podmínka
ISO	Izotropní deformační zpevnění materiálu
KIN	Kinematické deformační zpevnění materiálu
PISO	Kombinované deformační zpevnění materiálu
VaV	Výzkum a vývoj
JE	Jaderná elektrárna
JEDU	Jaderná elektrárna Dukovany
JETE	Jaderná elektrárna Temelín
HSS	Heterogenní svarový spoj
WOL	Weld overlay (technologie opravy heterogenních svarových spojů)

Zkratka	Význam
SCC	Stress corrosion cracking (korozní praskání pod napětím)
FSWOL	Full structural weld overlay ("plný návar" předpokládá se použití u HSS s vadou přes celou původní tloušťku HSS)
OWOL	Optimized weld overlay ("optimalizovaný návar" předpokládá se použití u HSS s vadou max. do 75 % původní tloušťky HSS)
EPRI	Electric power research institute (výzkumná instituce v energetickém průmyslu v USA)
ID	Vnitřní průměr
OD	Vnější průměr
NDT	Nedestruktivní kontroly
DP	Disertační práce
EP m. m.	Elasto-plastický model materiálu
EVP m. m.	Elasto-viskoplastický model materiálu

Seznam symbolů

Symbol	Název	Jednotka
ε	Přetvoření	[-]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Normálové složky přetvoření ve směru os	[-]
ε_T	Celkové přetvoření	[-]
$\varepsilon^T, \varepsilon^{th}$	Teplotní přetvoření	[-]
ε^{el}	Elastické přetvoření	[-]
ε^{pl}	Plastické přetvoření	[-]
ε^{tp}	Transformační plasticita	[-]
ε^{vp}	Viskoplastické přetvoření	[-]
$\dot{\varepsilon}^{vp}$	Rychlost viskoplastického přetvoření	[1/s]
$\dot{\varepsilon}^{eq}$	Rychlost redukovaného (HMH) viskoplastického přetvoření	[1/s]
ε^{eff}	Aktuální viskoplastické přetvoření	[-]
$\dot{\varepsilon}_0$	Počáteční rychlost přetvoření primárního creepu	[1/s]
σ	Napětí	[MPa]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normálové složky napětí ve směru os	[MPa]
σ_L	Podélné (longitudinální) napětí	[MPa]
σ_T	Příčné (transversální) napětí	[MPa]
σ_B	Blokovací napětí	[MPa]
σ_0	Počáteční napětí	[MPa]
σ^{eq}	Redukované napětí dle HMH	[MPa]
H	Deformační zpevnění materiálu	[MPa]
Re	Mez kluzu materiálu	[MPa]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
μ	Poissonovo číslo	[-]
k, n	Materiálové charakteristiky popisující rovnici typu Ramberg-Osgood	[MPa], [-]
k	Koeficient transformační plasticity	[MPa ⁻¹]
K	Koeficient zpevnění	[MPa]
M	Exponent zpevnění	[-]
N, n	Exponent rychlosti přetvoření	[-]
σ^y	Relaxační napětí ("viskoplastická mez kluzu")	[MPa]
H, C, P	Viskoplastické parametry popisující sekundární creep	[-]
λ, N	Parametry popisující Nortonův kapalinový nelineární tlumič	
α	Koeficient teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
λ	Koeficient tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

Symbol	Název	Jednotka
c	Měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	Hustota materiálu	[kg·m ⁻³]
β	Koeficient přestupu tepla ocel-vzduch	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
η	Účinnost svařovacího procesu	[%]
I	Svařovací proud	[A]
U	Svařovací napětí	[V]
Q _s	Specifické vnesené teplo na jednotku délky svaru	[J/mm]
v _s	Rychlost svařování	[mm/s]
HV	Tvrдость podle Vickerse	[HV]
Δt _{8/5}	Čas chladnutí svaru mezi teplotami 800°C a 500°C	[s]
A _{C1}	Teplota začátku austenitické přeměny	[°C]
A _{C3}	Teplota konce austenitické přeměny	[°C]
T	Teplota	[°C]
T _T	Teplota tavení materiálu	[°C]
T _L	Lokální teplota	[°C]
T ₀	Počáteční teplota	[°C]
T ₂₀	Pokojová teplota	[°C]
α	Alfa fáze - metalurgické struktury jako např. ferit, perlit, bainit, martenzit	
γ	Gama fáze - metalurgická struktura austenit	
P _i	Podíl vznikající fáze	[-]
f(p)	Funkce, vyjadřující podíl nerozpadlého austenitu ve struktuře	[-]
t	Čas	[s]
X, Y	Substituce	
X, Y, Z	Osy souřadného systému	