

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 438

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Vladimír Diviš

**Numerické analýzy MKP
v oblasti technologie svařování**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ing. Vladimír Diviš

**NUMERICKÉ ANALÝZY MKP V OBLASTI
TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ**

NUMERICAL ANALYSES OF WELDING BY
FINITE ELEMENT METHOD

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Odbor technologie svařování a povrchových úprav
Školitel: Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
Oponenti: Doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.
Doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
Datum obhajoby: 18. 12. 2007

Klíčová slova: numerické analýzy svařování, MKP, distorze, SYSWELD, ITER

Key words: numerical analyses welding, FEM, distortions, SYSWELD, ITER

Práce je uložena v areálové knihovně VUT – FSI v Brně, Technická 2, 616 69

OBSAH

OBSAH	3
1. ÚVOD.....	5
1.1 Cíle disertační práce.....	6
1.2 Způsob dosažení cílů.....	6
2. METODY ŘEŠENÍ NUMERICKÝCH ANALÝZ SVAŘOVÁNÍ	10
2.1 Transientní numerická analýza	10
2.2 Metoda makroelementů.....	10
2.3 Lokálně globální přístup	11
3. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM.....	13
4. SHRUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	13
5. PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE A DALŠÍ VÝVOJ	17
6. ZÁVĚR	22
Seznam použité literatury	24
Curriculum Vitae.....	26
Abstract	28

1. ÚVOD

Svařování jsou vysoce produktivní technologie spojování materiálu. Tyto technologie našly uplatnění ve všech nejvýznamnějších oblastech průmyslové výroby. V automobilovém, leteckém a lodním průmyslu, ale i v energetickém, petrochemickém a stavebním průmyslu. Se vzrůstajícími požadavky na kvalitu svařenců je jedním z hlavních cílů každého výrobce zaručit správnou funkci a požadovanou životnost svařovaných součástí. Uvedených cílů je možné dosáhnout vytvořením robotizovaného pracoviště, modernizací svařovacích strojů, změnou technologie svařování, konstrukčními změnami svařovaných celků apod., ale také modernizací laboratorních přístrojů, prováděním experimentálních měření a využitím numerických analýz svařování. Numerické analýzy svařování založené na metodě konečných prvků (MKP) jsou bezesporu mocným nástrojem, vedoucím k detailnímu pochopení svařovacího procesu. Programový soubor SYSWELD, francouzské společnosti ESI GROUP je pravděpodobně momentálně jeden z nejlepších komerčně využívaných softwarů pro numerické analýzy svařování. Ústav Aplikované Mechaniky Brno s.r.o. (ÚAM) již 12 let vlastní licenci k používání programového souboru SYSWELD, který aktivně používá pro řešení komerčních i vědeckých projektů. U komerčních projektů je požadováno co možná nejrychlejší a spolehlivé řešení daného technického problému, nevyžaduje se již sepsání tolik důležitých vědeckých poznatků získaných při jejich řešení. Naopak výsledky výzkumných projektů jsou právě mnohdy znehodnoceny faktem, že řešené složité technické detaily je možné jen stěží zpětně zhodnotit a verifikovat.

Numerické analýzy svařování v současné době plně nenahradí experimentální měření. Je zapotřebí vždy provádět podpůrné, ověřovací experimenty a zároveň zlepšování výpočtových metodik. Je třeba je chápat jen jako účinnou pomůcku pro rozhodování. Nelze je brát jako jediný faktor pro konečné rozhodnutí o řešení daného technického problému! V současné době mají numerické analýzy svařování především porovnávací charakter mezi navrhovanými variantami svařování tj. výběr optimální varianty. Dobré kvantitativní porovnání vyžaduje sérii experimentálních měření, detailní pochopení konkrétního svařovacího procesu včetně zadání kvalitních vstupních dat a okrajových podmínek. Při řešení komerčních projektů zatím není možné splnit tyto požadavky z časových a finančních důvodů, proto je důležité, aby byly doprovázeny vědeckými projekty, které umožňují zkoumat složité technické detaily a tím splňovat neustále vzrůstající požadavky na kvalitu svařovaných součástí.

Jedním z nejdůležitějších kvalitativních požadavků svařovaných součástí je minimalizace distorzí jednotlivých svařovaných částí. V novodobém trendu unifikace menších svařovaných výrobků (automobilový průmysl) představují právě distorze jeden z největších problémů. Avšak zatímco rozměrově menší svařované

součásti s malým počtem a malou délkou svarových spojů (automobilový průmysl) je možné uspokojivě řešit pomocí již zavedených a ověřených výpočetních metodik, rozměrově velké svařované součásti s velkým počtem a velkou délkou svarových spojů (lodní a energetický průmysl) není možné zavedenými metodami efektivně řešit vzhledem k jejich časové a hardwarové náročnosti. Navrhovaná práce si klade za cíl vypracovat výpočetní metodiku pro efektivní řešení distorzí velkých svařovaných konstrukčních celků na základě zkušeností získaných při řešení komerčních i výzkumných projektů na ÚAM. Práce navazuje na disertační práce [1,2].

1.1 Cíle disertační práce

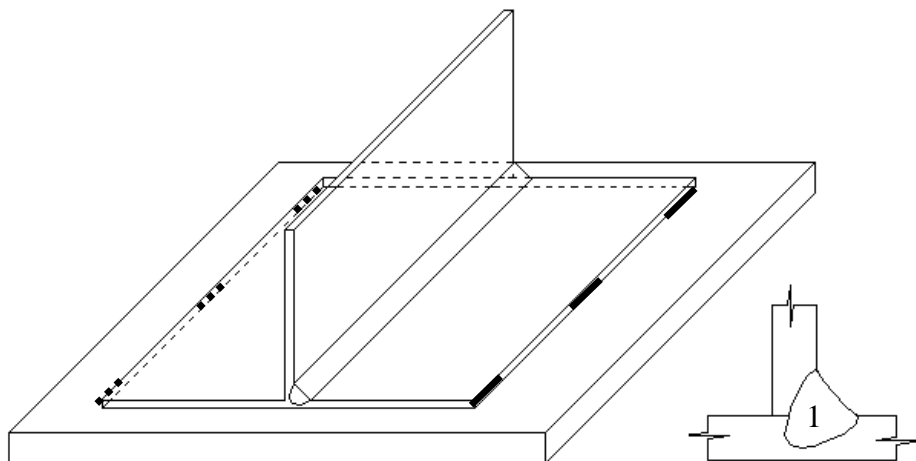
Hlavním cílem disertační práce je zefektivnit výpočetní metodiky predikce distorzí svařování velkých konstrukčních celků. Cílem je dosažení reálnějších výsledků numerických analýz za přijatelného výpočetního času a přijatelných hardwarových nároků. Zefektivnění spočívá ve využití metodiky MBD (metody makroelementů - kap. 2.2) pro provedení analýz lokálních 3D modelů pro tvarově složité konstrukce s žebry a výztuhy vedené přes svarové spoje. Správnost výsledků provedených analýz bude ověřena vhodným experimentálním měřením. Výsledky disertační práce budou přímo aplikovatelné pro predikci distorzí velkých svařovaných součástí (energetický a lodní průmysl) a významnou měrou tak přispějí při návrhu finální technologie výroby svařované vakuové nádoby fúzního reaktoru v rámci projektu ITER (International Thermo-nuclear Experimental Reaktor - celosvětový výzkumný projekt výroby elektrické energie na bázi termionukleární fúze). ÚAM poskytuje technickou pomoc [3,4,5,6,7,8] při návrhu konečné technologie svařování a svařovacího postupu na základě predikce distorzí numerických analýz svařování.

1.2 Způsob dosažení cílů

Při řešení úkolů na ÚAM byly vždy v potřebném rozsahu prováděny numerické analýzy svařování a experimentální měření, tak aby potvrzovaly správnost použitých metodik, postupů a zjednodušení při řešení. Na základě získaných zkušeností z těchto úkolů a dle souhrnu nejnovějších teoretických poznatků z [2,12,13,15,16,17,18,19] o deformacích v technologii svařování a faktorů mající vliv na distorze svařovaných součástí byl sestaven experimentální program (kap. 3) a provedeny numerické analýzy dle následujícího postupu, který postupně ověřuje možnosti MBD analýz pro naplnění výše uvedených cílů:

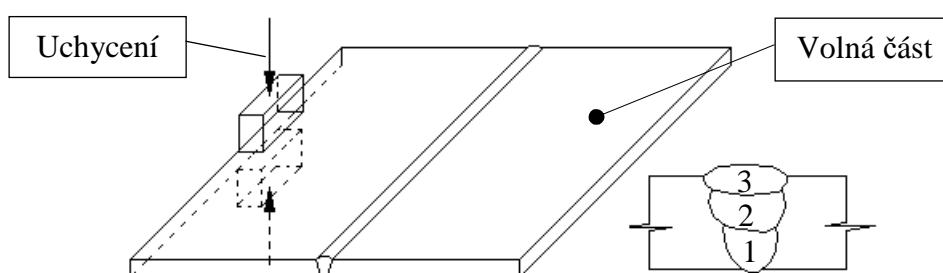
a) Svařování jedné svarové housenky. Jako první krok k seznámení se s metodikou MBD byl zvolen jednoduchý případ svařování desek svarem typu T o tloušťce 5 mm z oceli 11503 pomocí jedné svarové housenky technologií MAG (obr. 1.2.1). Byly provedeny numerické MBD analýzy tohoto případu svařování a ty porovnány s experimentálním měřením a numerickými analýzami svařování

metodou TNA (transientní numerická analýza – kap. 2.1). Na základě těchto analýz, měření a porovnání byla zhodnocena použitelnost MBD analýz z hlediska časové náročnosti, hardwarových nároků a nároků na výpočetní model. Výsledky analýz této části byly uvedeny v pojednání k disertační práci [10] a prezentovány na státní doktorské zkoušce.

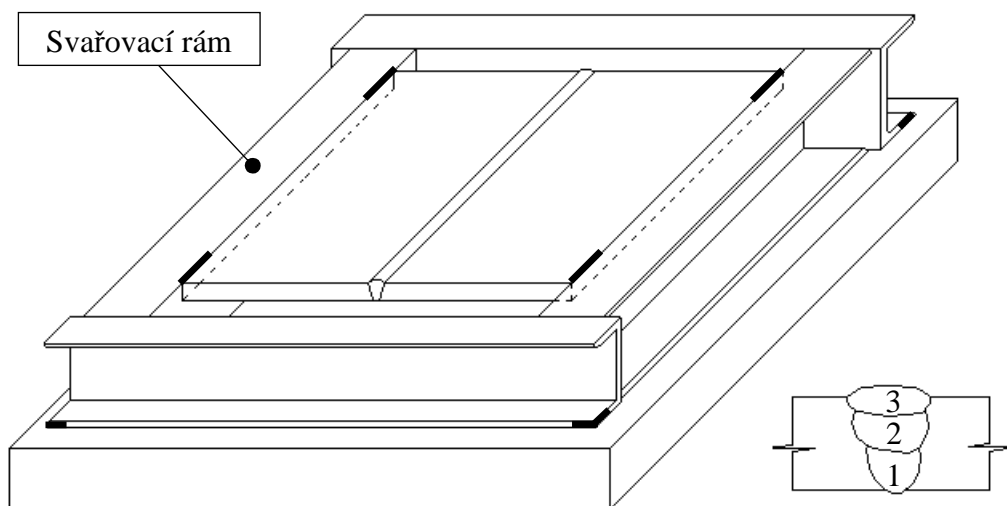


Obr. 1.2.1 Znárodnění případu svařování T-svaru

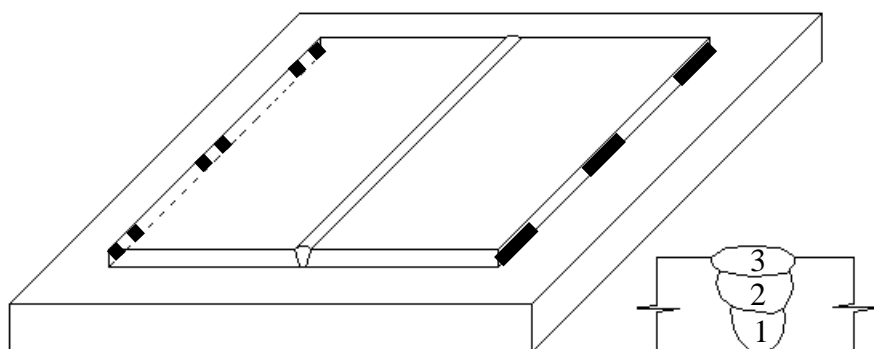
b) Svařování s rozdílným uchycením. Dalším krokem bylo ověřit použitelnost MBD pro vícevrstvý svarový spoj s rozdílnými druhy uchycení svařovaných částí představující rozdílné tuhosti svařovacích přípravků. Pro ověření byly zvoleny případy experimentů svařování desek tloušťky 10 mm tupým svarovým spojem se třemi svarovými housenkami s volným koncem (obr. 1.2.2), v rámu (obr. 1.2.3) a na desce (obr. 1.2.4). Pro jednotlivé případy byly provedeny analýzy MBD a ty porovnány s experimentálním měřením. Na základě výsledků těchto analýz, měření a porovnání byla zhodnocena použitelnost MBD analýz z hlediska vlivu rozdílného uchycení svařovaných částí na výsledné distorze.



Obr. 1.2.2 Znárodnění případu svařování desek s volným koncem



Obr. 1.2.3 Znáznění případu svařování desek v rámu

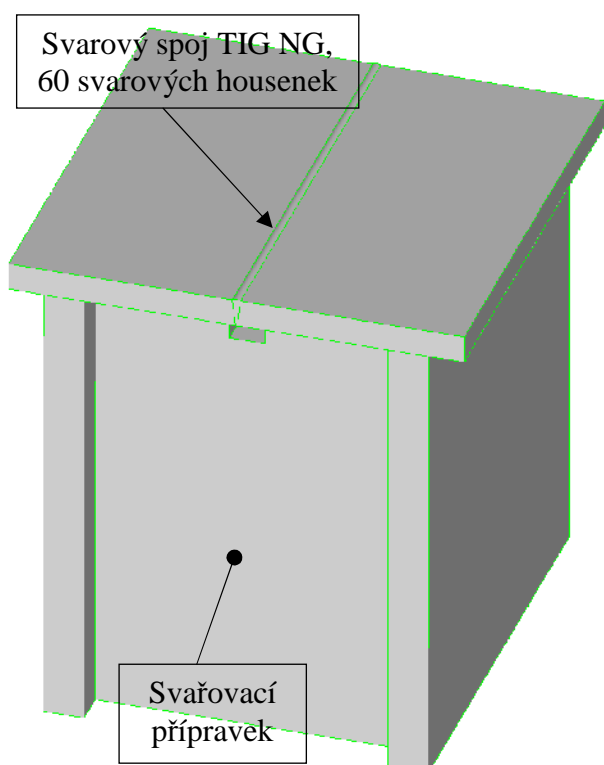


Obr. 1.2.4 Znáznění případu svařování desek na desce

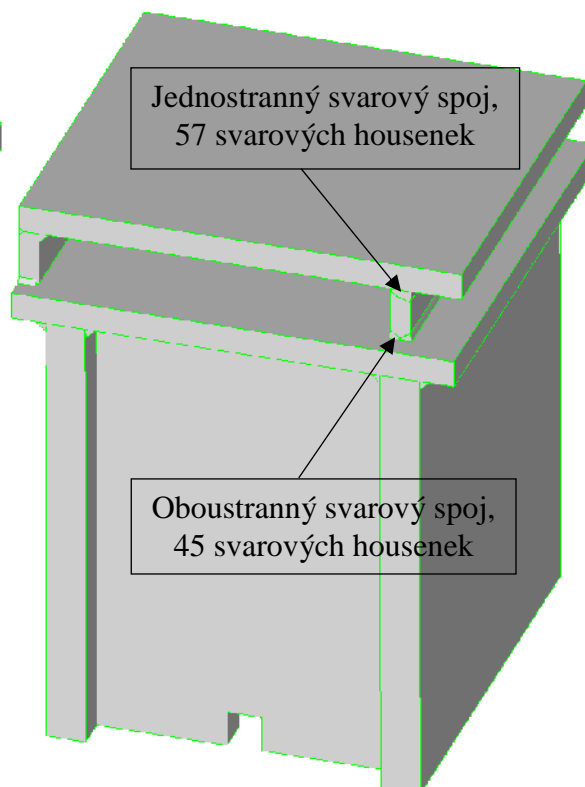
c) Svařování vícevrstvého svarového spoje (VMO). V této části bylo třeba zjistit možnost použití testované metodiky MBD pro skutečný jeden svarový spoj vyskytující se na reaktorové nádobě. Pro tento krok bylo zvoleno experimentální měření tzv. VMO („Validation mock-up“ - ověřovací tzv. validační experiment) (obr. 1.2.5). Jedná se o svařování desek o tloušťce 60 mm do úzké mezery TIG NG pomocí cca šedesáti svarových housenek. Byly provedeny numerické analýzy MBD 3D lokálního modelu a analýzy TNA 2D lokálních modelů. Na základě výsledků distorzí lokálních analýz byla posouzena možnost přenosu výsledných deformací v oblasti svarového spoje na 3D globální model pomocí metodiky LGA (lokálně globální přístup – kap. 2.3). Výsledky přenosu byly vyhodnoceny pro následující analýzy LMVMO. V této části nebyla zjišťována pouze časová a hardwarová náročnost jednotlivých analýz, ale také porovnání skutečných a vypočtených (lokálních a globálních) distorzí po svaření a po uvolnění svařovaných desek ze svařovacího přípravku.

d) Svařování dvou vícevrstvěch svarových spojů (LMVMO). V posledním kroku bylo třeba ověřit použití metodiky MBD pro následný přenos pomocí metodiky LGA při svařování více svarových spojů. Pro tento krok byl použit další provedení experiment tzv. LMVMO („Local modelling validation mock-up“ - ověřovací tzv. validační experiment) (obr. 1.2.6) obsahující dva svarové spoje

typu „T“ (oboustranný – cca 45 svarových housenek a jednostranný – cca 57 svarových housenek) vyskytujících se na reaktorové nádobě. Svařované tloušťky desek byly 40 a 60 mm. Byly provedeny numerické analýzy MBD 3D lokálních modelů a analýzy TNA 2D lokálních modelů jednotlivých svarů. Na základě variantních přenosů deformací z lokálních modelů na globální model byly stanoveny možnosti použití 3D a 2D lokálních modelů pro dosažení skutečných distorzí dle provedeného experimentálního měření.



Obr. 1.2.5 VMO



Obr. 1.2.6 LMVMO

2. METODY ŘEŠENÍ NUMERICKÝCH ANALÝZ SVAŘOVÁNÍ

Pro příznivé ovlivnění deformačního chování svařovaných součástí je zapotřebí detailních znalostí o celém procesu svařování a použité technologie. Problematika vzniku distorzí je z fyzikálního hlediska velmi složitá a proto ji nelze zobecnit pro reálné svařované součásti pomocí analytických vztahů a grafických závislostí jak je například uvedeno v [11]. Ty jsou platné pouze pro konkrétní případy svařování tzn. pro dané parametry svařování, typ svarového spoje, způsob upnutí, materiál apod. Pro minimalizaci výsledných distorzí při svařování je třeba téměř vždy nalézt kompromis mezi jednotlivými faktory, které je ovlivňují. To je možné pouze dvěma způsoby a to na základě provedení variantních experimentálních měření skutečné svařované součásti (což většinou z časových a finančních důvodů u velkých svařovaných součástí není možné) a nebo pomocí variantních numerických analýz skutečné svařované součásti. Numerické analýzy svařování pomocí programového souboru SYSWELD francouzské společnosti ESI GROUP umožňují řešit deformační chování reálné konstrukce skutečných velikostí s téměř všemi nejdůležitějšími fyzikálními a metalurgickými ději. SYSWELD v současnosti nabízí následující tři metodiky řešení numerických analýz svařování [27]. Vysvětlení jednotlivých metodik na příkladech je uvedeno v pojednání k disertační práci [10].

2.1 *Transientní numerická analýza*

Představuje klasický způsob řešení numerických analýz svařování tzv. „step-by-step“ metodu řešení krok po kroku. Množství vneseného tepla musí odpovídat skutečnosti a tak celý svařovací proces je analyzován postupně pro každý časový okamžik svařování. Každá svarová housenka je analyzována samostatně. Časové okamžiky jsou zvoleny tak, aby byl popsán celý proces svařování ve shodě se skutečností. Metoda vyžaduje velmi jemnou konečně-prvkovou síť elementů v oblasti svarových housenek a malý výpočtový časový krok s ohledem na rychlost svařování. Rozložení tepla v prostoru v každém časovém okamžiku je zadáváno vhodným modelem tepelného zdroje. Výhodou metody jsou velmi přesné výsledky analýz, nevýhodou dlouhé výpočtové časy. Výsledkem analýz jsou teplotní pole, množství struktur materiálu, napěťové pole, poměrné deformace a distorze. TNA lze rozdělit do následujících tří kroků: nalezení vstupních parametrů diagramu transformačních přeměn, teplotně-strukturní analýza a mechanicko-strukturní analýza.

2.2 *Metoda makroelementů*

Řešení numerických analýz svařování pomocí „macro bead deposit“ (MBD) resp. metodou makroelementů nebo-li tzv. substruktur se skládá ze stejných kroků jako předchozí TNA, tzn.: nalezení vstupních parametrů diagramu transformačních přeměn, teplotně-strukturní analýza a mechanicko-strukturní analýza. Rozdíl je však

v provedení teplotní analýzy. Zatímco u TNA je vnesené teplo do materiálu zadáváno pomocí matematického modelu tepelného zdroje, kde simulace pohybu je dána závislostí na čase a souřadnicích v prostoru, u MBD je teplotní analýza provedena tak, že celkové vnesené teplo je „vkládáno“ do celého objemu svarové housenky. To může být provedeno dvěma způsoby. První způsob je „vlození“ celkového vneseného tepla naráz do svarové housenky pomocí fiktivní teploty. To je pak uvolňováno do základního materiálu za pomoci tepelných kontaktů mezi svarovým kovem a základním materiálem. Přestup tepla mezi tepelnými kontakty musí být takový, aby došlo ke skutečnému protavení.

Druhý způsob je „vlození“ teploty po určitý čas do objemu elementů celé svarové housenky dle celkového vneseného tepla při svařování a skutečné velikosti protavení. Velikostí teploty můžeme měnit velikost protavení. K protavení není využito tepelných kontaktů, ale pouze tepelné vodivosti materiálu. Čas po který je třeba „držet“ teplotu v objemu elementů svarové housenky (čas teploty v elementech) lze stanovit z tepelného toku. Čas teploty v elementech lze rovněž orientačně určit z délky svarové lázně resp. čas po který je „držena“ daná teplota v elementech odpovídá času, který je potřeba k uražení dráhy o délce svarové lázně.

Uvedené případy stanovení času teploty v elementech jsou pouze přibližné a slouží pro prvotní numerické analýzy. Vzhledem ke složitosti probíhajících fyzikálních jevů při svařování je zapotřebí „přesný“ (resp. potřebný) čas teploty v elementech upravit dle výsledků smrštění a distorzí validačního experimentu.

2.3 Lokálně globální přístup

Během několika posledních let byl vyvinut nový způsob řešení predikce distorzí velkých svařovaných součástí tzv. „local global approach“ (LGA) - lokálně globální přístup řešení. Svařované součásti velkých rozměrů a tloušťek stěn obsahující velké množství svarových housenek, nelze pomocí TNA a MBD analyzovat z následujících důvodů:

1. Nelze vytvořit model celé konstrukce, maximálně jenom části nebo provést analýzu jako rovinný model, který ovšem nevystihuje skutečnou tuhost konstrukce.
2. Vzhledem k velkým výpočetním časům nelze efektivně provádět optimalizaci svarových spojů, postupu svařování nebo způsobů upnutí svařované součásti.
3. Použití různých technologií svařování.

Cílem tedy bylo vytvořit metodu, pomocí které by mohly být predikovány a optimalizovány distorze konstrukce během velmi krátkého času. LGA představuje kombinaci TNA či MBD a elastické analýzy globálního modelu. Postup řešení LGA lze rozdělit do následujících dvou kroků:

1. Výpočet celkové poměrné deformace v oblasti svarového spoje pomocí TNA či MBD na lokálních modelech všech typických svarových spojů, vyskytujících se na konstrukci. Velká svařovaná součást téměř vždy obsahuje několik typů svarových spojů lišící se svařovacími technologiemi, parametry svařování (svařovací proud, napětí apod.) a tuhostí konstrukce (různá tloušťka plechů). Analýzy mohou být provedeny pomocí prostorových nebo rovinných lokálních modelů s ohledem na skutečnou tuhost konstrukce.
2. Přenesení celkové poměrné deformace vypočítané na lokálních modelech do příslušných elementů globálního modelu reprezentující celou konstrukci včetně všech svarových spojů. Globální model může být vytvořen jako kombinace prostorových (svarové spoje), skořepinových (konstrukce) a prutových (podpěry) prvků. Výhoda globálního modelu je, že není celý vytvořen z prostorových prvků, které neúměrně prodlužují výpočetní čas. Po přenesení deformací je provedena globální elastická analýza se zahrnutím svařovací sekvence, tzn. postupu svařování a přidávání jednotlivých částí. Na základě vypočtených distorzí lze provádět optimalizaci svařovacího postupu. Přenos deformací probíhá během každého následujícího výrobního kroku v jednotlivých výrobních krocích.

LGA metoda je založena na rovnováze vnitřních sil, tzn. že přenesené celkové poměrné deformace jsou transformovány na vnitřní síly, které jsou zatížením pro elastickou globální analýzu. Elastická globální analýza provede přerozdělení vnitřních sil tak, aby celá soustava byla v rovnováze tím, že je konstrukce deformována. LGA metoda předpokládá rovnoměrné rozložení teplot svařence při každém počátku přenášení plastických deformací jako další svařované housenky. Není možné ji proto použít pro svařence, kde při svařování dalších housenek je teplotní pole významně nehomogenní.

Z výše uvedených popisů jednotlivých výpočtových metodik analýz svařování je zřejmé, že TNA je vhodná pro menší svařence a validační experimenty s malým počtem krátkých svarových housenek a tam, kde požadujeme vysokou přesnost výsledků. MBD představuje kompromis mezi TNA a LGA. Je určena především pro analýzu větších svařenců, kde lze připustit určitá zjednodušení, ale kde požadujeme dostatečnou přesnost výsledků. Míru zjednodušení můžeme volit počtem kroků simulující pohyb zdroje a jemností sítě vzhledem k výpočtovému času. Pro svařence velkých rozměrů s velkým počtem svarových housenek je nutno použít LGA metodiku svařování.

3. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Pro ověření možnosti použití MBD numerických analýz pro predikci distorzí svařování velkých konstrukčních celků byl sestaven následující experimentální program (dle kap. 1.2):

- Svařování s rozdílným uchycením
 - Svařování s volným koncem (obr. 1.2.2)
 - Svařování v rámu (obr. 1.2.3)
 - Svařování na desce (obr. 1.2.4)
- Svařování vícevrstvého svarového spoje (VMO) (obr. 1.2.5)
- Svařování dvou vícevrstvých svarových spojů (LMVMO) (obr. 1.2.6)

Uvedená experimentální měření jsou provedena z oceli A316L, která je ekvivalentem oceli reaktorové nádoby AISI 316L(N) ITER GRADE. Experimentální měření svařování s rozdílným uchycením byla provedena v rámci úkolů ÚAM na Vysoké škole Báňské –technická univerzita Ostrava (VŠB-TUO). Kompletní popis provedených experimentů je uveden v [3,6] a popis použité měřicí techniky v [2].

Svaření a měření potřebných parametrů ověřovacích tzv. „mock up“ experimentů VMO a LMVMO bylo provedeno italskou společností ANSALDO v Itálii. Podrobné výsledky a postupy provádění experimentů jsou uvedeny v [30,31,32,33]. Popis použité měřicí techniky nebyl k dispozici. Tyto experimenty byly navrženy tak, aby obsahovaly základní typy svarových spojů, které budou použity při svařování jednotlivých částí reaktorové nádoby ITER.

4. SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Svařování s volným koncem

- Příklad svařování desek s volným koncem pomocí tupého svarového spoje představuje svařování malého počtu svarových housenek s velmi malou tuhostí uchycení desek resp. bez svařovacího přípravku. Jedná se tedy o laboratorní experiment, neboť svařování jednostranného tupého svarového spoje bez uchycení se ve skutečnosti neprovádí.
- Použití MBD metodiky pro tento případ svařování není možné, neboť zjednodušení vyplývající z MBD (změna tuhosti zadáním teploty do elementů svarových housenek a rozdílný průběh teplotních gradientů) mají významný vliv na celkové deformační chování. To znamená, že

MBD metodiky nelze použít pro konstrukce s malým počtem svarových housenek s malou tuhostí uchycení.

- Pro tento případ svařování je nutné použít TNA metodiku řešení. Výsledky těchto analýz jsou součástí zprávy [4].

Svařování v rámu

- Příklad svařování desek v rámu představuje svařování malého počtu svarových housenek s uchycením desek o tuhosti dané svařovacím přípravkem.
- Použití MBD metodiky pro tento případ svařování je možné pouze rozdělením zadávané teploty do elementů svarové housenky do více částí ve směru svařování resp. alespoň do dvou částí tzv. „na dva kroky“. Tím se omezí vliv změny tuhosti svařovaných desek zadáním teploty do elementů svarových housenek na deformační chování. Použití MBD metodiky však bude vykazovat menší úhlové distorze a tedy i menší distorze po uvolnění ze svařovacího přípravku, a to z důvodu rozdílného průběhu teplotních gradientů přes tloušťku stěny, vyplývající ze zjednodušeného zadání tepelného zdroje MBD, a skutečnost že při svařování malého počtu svarových housenek má každá významný vliv na deformační chování desek.
- I když je možné pro tento případ svařování s určitým výše uvedeným omezením použít MBD metodiky, ve skutečnosti by se vzhledem k malému počtu svarových housenek a pro získání přesnějších výsledků tento případ svařování analyzoval pomocí TNA metodiky, jak je uvedeno v [6].

Svařování na desce

- Příklad svařování desek na desce představuje svařování malého počtu svarových housenek s uchycením desek o velké tuhosti.
- Z výsledků MBD analýz vyplývá, že MBD metodika je vhodná pro predikci deformačního chování těchto případů svařování. Při větší tuhosti upnutí (oproti předchozím případům svařování) lze zadat zvolenou teplotu do celé délky elementů svarových housenek, aniž by došlo k nepříznivému ovlivnění tuhosti svařovaných dílců. Vliv rozdílných teplotních gradientů přes tloušťku stěny se nikterak negativně neprojeví, vzhledem k minimalizaci úhlových distorzí způsobem uchycení.
- Tento případ by se rovněž, vzhledem k malému počtu svarových housenek, mohl řešit i pomocí TNA metodiky. Výsledky tohoto řešení jsou uvedeny ve zprávě [6].

Svařování vícevrstvého svarového spoje (VMO)

- Příklad svařování VMO představuje svařování tupého svarového spoje do úzké mezery 60-ti svarovými housenkami technologií TIG. Tento svarový spoj se vyskytuje na reaktorové nádobě fúzního reaktoru ITER.
- Výsledky MBD analýz VMO potvrdily, že metodika MBD je vhodná pro svařované součásti s velkým počtem svarových housenek a s dostatečně tuhým uchycením. MBD dostatečně vystihuje deformační chování svařovaných desek v průběhu svařování, po svaření i po uvolnění ze svařovacího přípravku. Zjednodušení vyplývající z MBD (změna tuhosti zadáním teploty do elementů svarových housenek a rozdílný průběh teplotních gradientů) mají zanedbatelný vliv na celkové deformační chování. Pro celkovou predikci distorzí VMO postačí provést MBD analýzy. LGA již není třeba provádět, neboť VMO obsahuje pouze jeden svarový spoj. Provedená LGA analýza VMO má pouze demonstrační charakter.
- Příklad svařování VMO je možné řešit i pomocí TNA 2D lokálních modelů a jejich přenosem na LGA. Výsledky těchto analýz jsou uvedeny ve zprávě [8]. Toto řešení však není možné u konstrukčně složitějších částí reaktorové nádoby s výztuhy a žebry (viz. VVPSM – kap. 5).
- Potřebný výpočtový čas pro MBD analýzu jedné svarové housenky byl cca 33 minut (CPU 3GHz, 3GB RAM) tzn. cca 1,3 dne pro kompletní analýzu VMO.

Svařování dvou vícevrstvých svarových spojů (LMVMO)

- Poslední experimentální případ LMVMO představuje svařování dvou vícevrstvých svarových spojů typu T (oboustranný a jednostranný) rovněž se vyskytujících na vakuové nádobě fúzního reaktoru (ITER).
- Během numerické MBD analýzy svařování počátečních housenek svaru č.1 se vyskytly problémy jako u případu svařování desek v rámu. Zadáním teploty do celé délky svarových housenek se významně ovlivní tuhost žebra a tím i jeho výsledné distorze. Při svařování počátečních svarových housenek je proto nutné provést MBD analýzy na dva kroky, než se dosáhne potřebné tuhosti žebra vzhledem k základové desce. Opět je třeba zvážit, jako v případě svařování desek s volným koncem, potřebu numericky analyzovat svařování svaru č.1, neboť v praxi musí být proveden tak (sekvenční svařování), aby bylo dosaženo příznivých distorzí (žebro musí být kolmo k základové desce).
- Z výsledků je dále zřejmé, že pro svar č.2 lze s úspěchem použít MBD metodiku. Zjednodušení vyplývající z MBD mají zanedbatelný vliv na deformační chování.

- Ve skutečnosti by se případ svařování LMVMO numericky analyzoval pro každý svarový spoj zvlášť. Svar č.1 pro případné stanovení sekvenčního postupu svařování a svar č.2 pro predikci distorzí volného konce. Provedená LGA analýza je tak pouze demonstrační a nemusela by se provádět. Protože tuhost LMVMO v celé délce svařování je stejná (neobsahuje žádné výztuhy apod.) je možné pro výpočet lokálních modelů úspěšně použít i 2D TNA modely. Výsledky těchto analýz jsou součástí zprávy [8]. Toto řešení však opět není možné u konstrukčně složitějších částí (viz. VVPSM – kap. 5).
- Potřebný výpočtový čas pro MBD analýzu jedné svarové housenky byl cca 52 minut (CPU 3GHz, 3GB RAM) tzn. cca 3,5 dne pro kompletní MBD analýzu LMVMO.

Z výsledků rozdílných experimentálních případů vyplývá, že metodika MBD je méně vhodná (svařování v rámu), nebo ji nelze použít (svařování s volným koncem), pro případy svařování s malým počtem svarových housenek s malou tuhostí uchycení. Jako vhodná se ukázala pro případy svařování s velkým počet svarových housenek, kdy svařované části jsou dostatečně tuhé (VMO, LMVMO, VVPSM). Z časového a hardwarového hlediska (PC s operačním systémem Windows XP: CPU 3GHz, 3GB RAM) jsou MBD analýzy uvedených experimentálních případů řešitelné.

Z uvedeného dále vyplývá, že pro úspěšnou predikci deformačního chování za pomoci numerických analýz jakékoliv obecné svařované konstrukce je důležité správně zvolit metodiku řešení příp. kombinaci metodik. V následující tabulce 4.1 jsou, souhrnně ke každému experimentálnímu případu, uvedeny vhodné metodiky řešení. Je zřejmé, že pro predikci svařování velkých konstrukčních celků je nutné použít MBD metodiku v kombinaci s LGA (viz. VVPSM – kap. 5).

Tab. 4.1 Volba vhodné metodiky řešení experimentálních případů

Experimentální případ	TNA	MBD	LGA
Svařování s volným koncem	✓	✗	–
Svařování v rámu	✓	✓ ^[1]	–
Svařování na desce	✓	✓	–
VMO	✗	✓	–
LMVMO	✗	✓	–
VVPSM (kap. 5)	✗	✓	✓

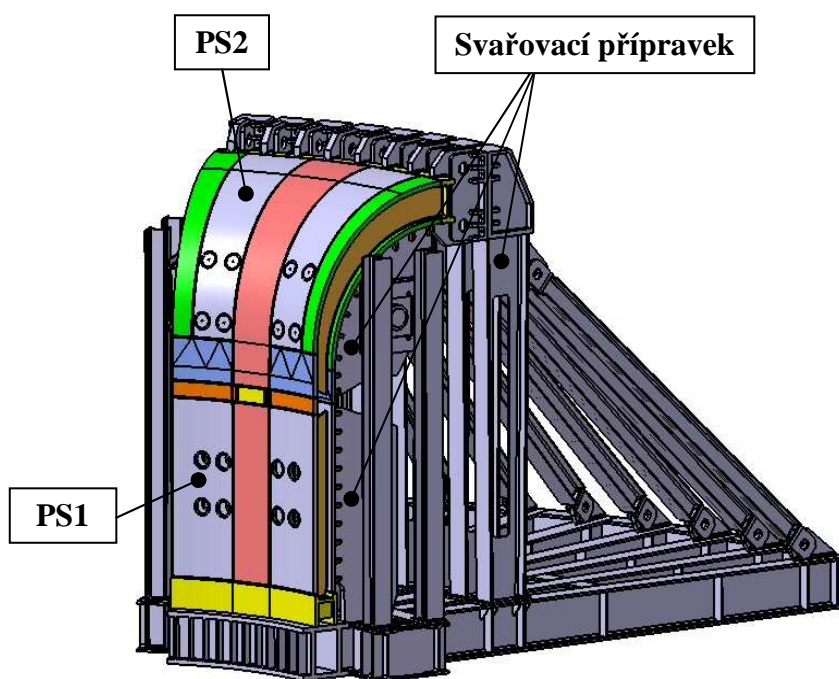
Pozn.:
tabulka vychází za předpokladu použití 3D výpočetních modelů

^[1] – bude vykazovat menší úhlové distorze a distorze po uvolnění

✓ - vhodná ✗ - nevhodná – - není třeba použít

5. PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE A DALŠÍ VÝVOJ

Na základě provedených MBD analýz v této disertační práci byla postupně ověřena použitelnost MBD metodiky pro různé případy svařování. Použití MBD společně s LGA vytváří možnost efektivně predikovat distorze velkých svařovaných konstrukčních celků, jakou je i svařovaná reaktorová nádoba fúzního reaktoru ITER. Na základě výsledků této disertační práce při řešení jednotlivých experimentálních případů a zkušeností z dalších úkolů ÚAM [14, 35, 36, 37] byl řešen projekt Evropské unie, jehož zadavatelem je nadnárodní společnost EFDA pro výzkum a výrobu projektu ITER. Cílem zadaného projektu bylo predikovat distorze svařovaných částí PS1 a PS2 nádoby fúzního reaktoru tzv. VVPSM (Vacuum vessel poloidal segment). Projekt byl rozdělen na tři části. V první části [8] byla provedena numerická verifikace na validačních experimentech VMO a LMVMO tří typických svarových spojů vyskytujících se na reaktorové nádobě. Jednalo se o svarový spoj TIG NG na VMO, oboustranný svarový T-spoj a jednostranný svarový T-spoj na LMVMO. V druhé části [9] byly provedeny optimalizační numerické analýzy postupu svařování části PS1 k PS2 (obr. 5.1) a v třetí, poslední části [34] byly numericky predikovány distorze samostatně svařovaných částí PS1 (obr. 5.2) a PS2. Všechny tři části byly řešeny za pomoci MBD analýz. V případě samostatně svařovaných částí PS1 a PS2 i s využitím LGA. Vzhledem k obsáhlosti řešeného úkolu budou uvedeny pouze dílčí výsledky a postupy vybraného samostatného svařování části PS1. Kompletní výsledky jsou součástí technických zpráv [8, 9 a 34]. Postup svařování PS1 je uveden na obr. 5.2. Numericky analyzovány byly pouze červeně vyznačené kroky svařování, ostatní mají zanedbatelný vliv na celkové deformační chování PS1.



Obr. 5.1 Nákres svařování části PS1 k PS2



Obr. 5.2 Postup svařování části PS1

Pro provedení numerických analýz svařování PS1 bylo vytvořeno 5 lokálních modelů (LM1 až LM5) a jeden globální model (GM) jež jsou zobrazeny na obr. 5.3. Jednotlivé lokální modely byly vytvořeny následovně:

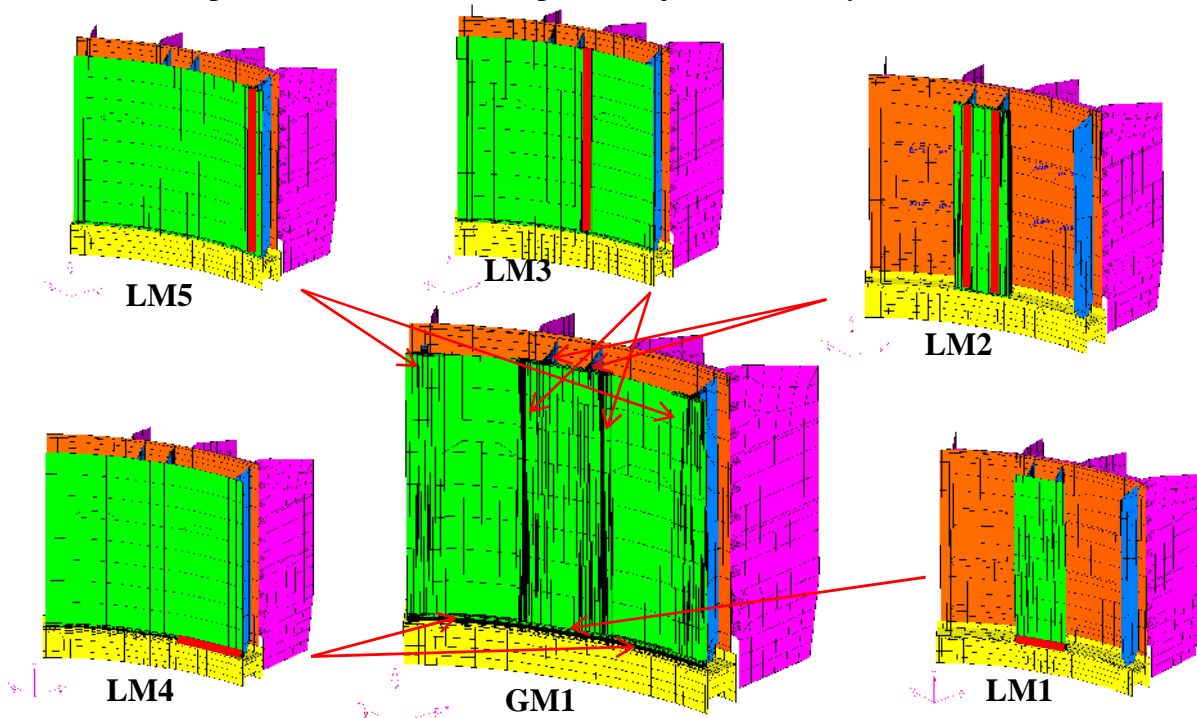
LM1 → pro TIG svařování prostředního segmentu vnější části nádoby ke spodní části.

LM2 → pro TIG svařování prostředního segmentu vnější části nádoby k žebřům.

LM3 → pro automatizované svařování TIG NG prostředního segmentu k levé a pravé vnější části nádoby.

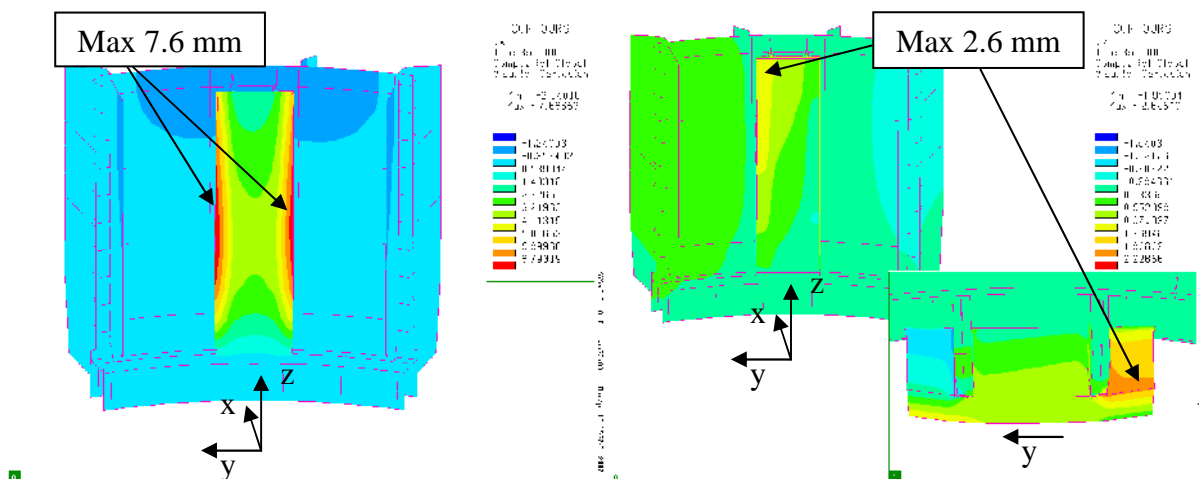
LM4 → pro TIG NG svařování levé a pravé vnější části nádoby ke spodní části.

LM5 → pro TIG svařování levé a pravé vnější části nádoby k žebřům.



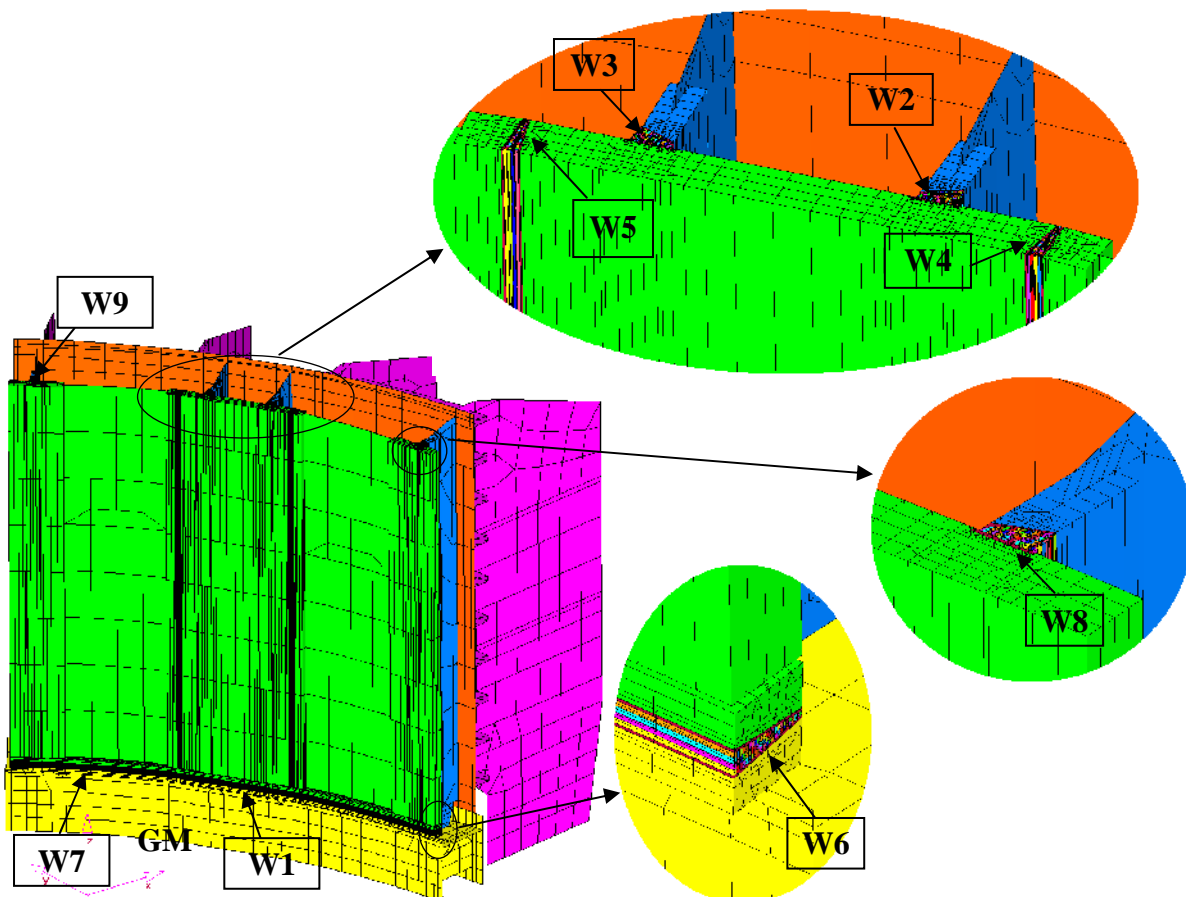
Obr. 5.3 Výpočtové lokální modely (LM1 až LM5) a globální model (GM1)

Oblasti svarových spojů výpočtových modelů byly tvořeny 3D elementy, čepy prutovými elementy a zbylé části modelu pomocí skořepinových elementů. Jednostranné svarové T-spoje obsahovaly 57 svarových housenek a tupé svarové spoje (svařování do úzké mezery) obsahovaly 60 svarových housenek. Dílčí výsledky distorzí analýz lokálních modelů jsou zobrazeny na obr. 5.4.

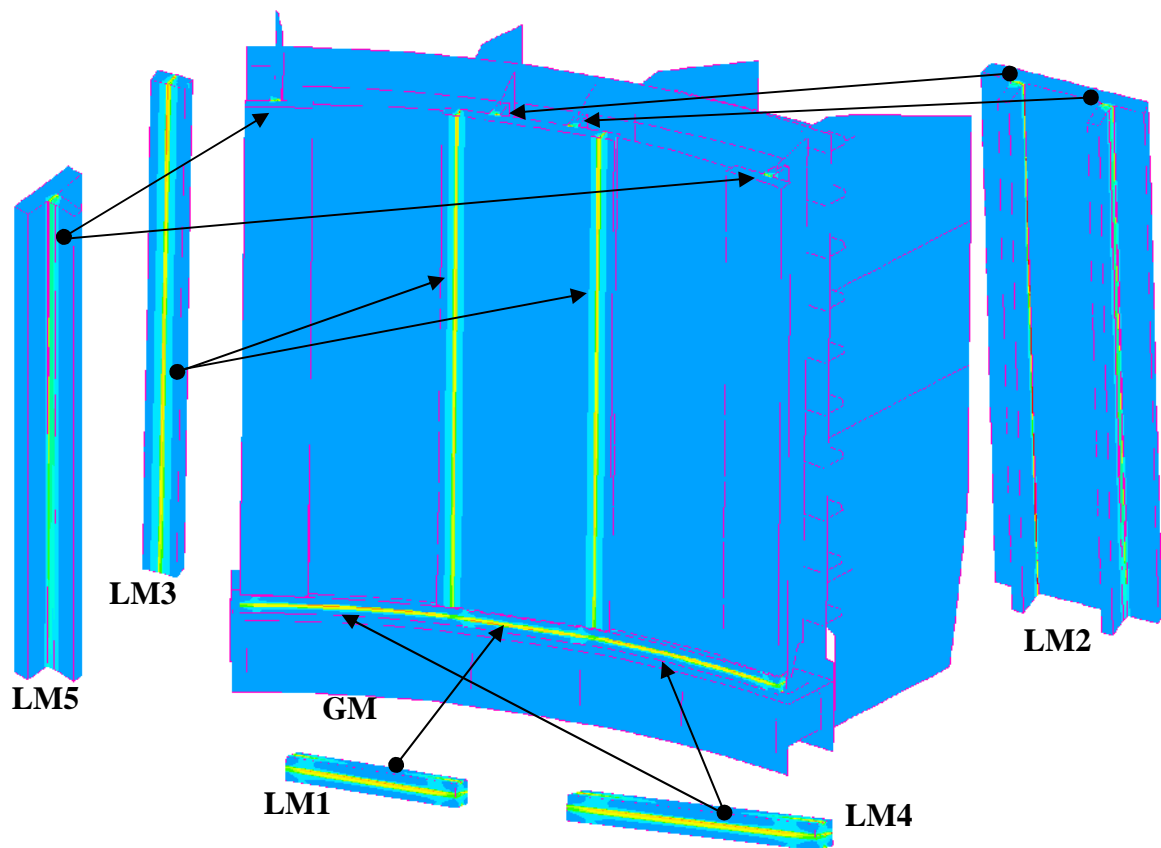


Obr. 5.4 Výsledné distorzce [mm] v ose x (vlevo) a v ose y (vpravo) po svaření LM2

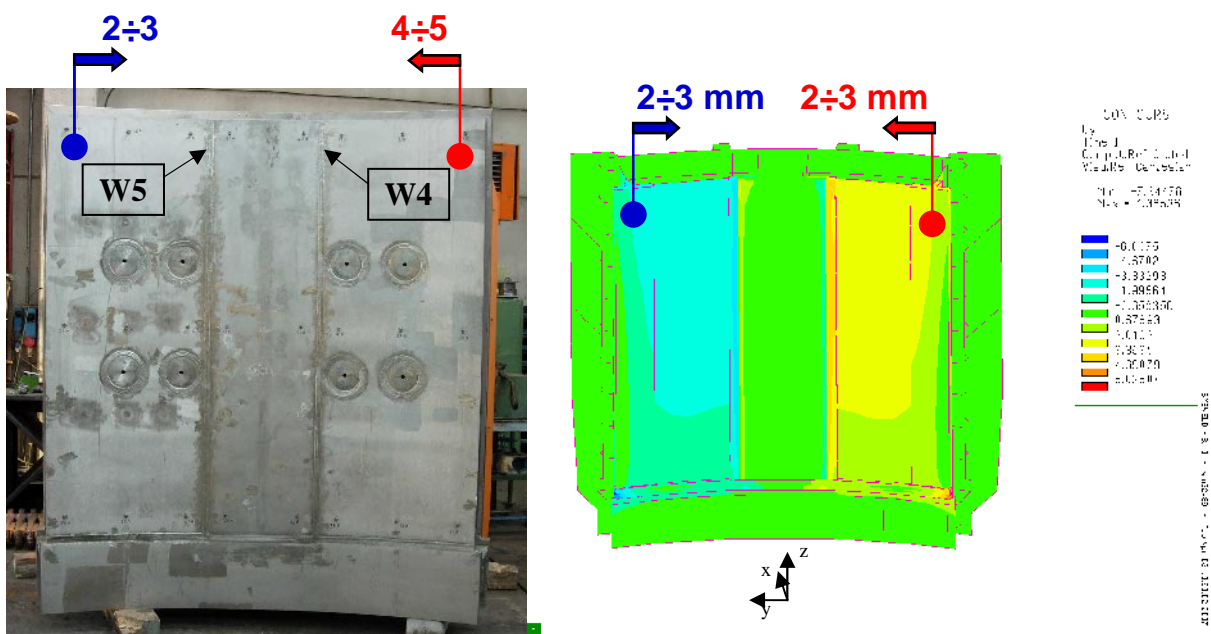
Globální model obsahoval 9 svarových spojů W1 až W9 (obr. 5.5). Vypočtené výsledné celkové poměrné deformace na 3D elementech lokálních modelů byly odděleny a přeneseny na globální model dle obr. 5.6. Ukázka porovnání dílčích výsledků distorzí globálních analýz s experimentálním měřením je na obr. 5.7.



Obr. 5.5 Globální výpočtový model PS1



Obr. 5.6 Přenos 3D oblastí (výsledných poměrných deformací [-]) z lokálních analýz na globální model



Obr. 5.7 Ukázka porovnání dílčích výsledků distorzí [mm] globálních analýz (vpravo) s experimentálním měřením (vlevo) podél osy y

Časová náročnost (výpočtový čas) řešení VVPSM resp. samostatné svařování PS1, samostatné svařování PS2 a svařování PS1 k PS2 je cca 3 až 5 dnů jednoho lokálního výpočtového modelu (CPU 3GHz, 3GB RAM). Doba výpočtového času u numerických analýz PS1 byla cca 18 dnů, PS2 cca 23 dnů a PS1 k PS2 cca 8 dnů.

Z technické zprávy [34] je patrné, že naměřené výsledky se v některých případech neshodovaly s vypočtenými, viz. ukázka porovnání na obr. 5.7. Příčinou jsou distorze od předchozího svařování, v tomto případě distorze uvedené na obr. 5.4 od svařování prostředního segmentu vnější části nádoby k žebřím. Tyto distorze způsobily změnu velikosti svarových úkosů a kořenové mezery sousedních svarových spojů W5 a W4. Svarový spoj W4 pak obsahoval větší množství svarového kovu (než bylo numericky analyzováno), než svarový spoj W5 a tudíž naměřené distorze pravé vnější části nádoby byly větší než vypočtené. Z uvedeného, pro další zlepšování metodik predikce distorzí velkých svařovaných konstrukčních celků, plyne důležitý závěr. Pro predikci skutečného deformačního chování je třeba, při každém následném kroku svařování, aby množství svarového kovu vycházelo z deformovaného tvaru svařované součásti od předchozího kroku svařování. Pro řešení následujícího úkolu, predikce distorzí 40° sektoru vakuové nádoby fúzního reaktoru ITER, je zapotřebí zvážit uvedenou skutečnost s ohledem na technologický postup výroby. Pro řešení 40° sektoru, který obsahuje mnohem více svarových spojů než VVPSM je dále zapotřebí:

- pečlivě volit, které svarové spoje numericky analyzovat a které zanedbat;
- dle postupu svařování vhodně rozdělit celý sektor na dílčí části (stanovit potřebný počet lokálních a globálních modelů), které numericky analyzovat samostatně;
- zvolit potřebná zjednodušení pro tvorbu výpočtových modelů. Výpočtové modely tak, jak byly vytvářeny pro VVPSM, vzhledem k časové náročnosti, není možné takto vytvářet.

Pro další rozvoj metodik a postupů numerických analýz svařování pro predikci deformačního chování svařovaných součástí je zapotřebí:

- zlepšení metodik a vypracování postupů tak, aby množství svarového kovu ve svarovém spoji vycházelo z deformovaného tvaru svařované součásti od předchozího kroku svařování;
- zabývat se problematikou křížení svarů;
- zjistit možnosti využití nekoincidentních (nenavazujících) sítí ve svařování;
- ověřit (numericky i experimentálně) deformačním chování při vnesení elastického předpětí, vlivu zbytkových napětí předchozích operací, vlivu velikosti meze kluzu na tuhost upnutí a ovlivnění teplotního pole apod.

- zvážit možnosti zlepšení zadání teplotního zdroje vzhledem k zjednodušení vyplývající z MBD (změna tuhosti zadáním teploty do elementů svarových housenek a rozdílný průběh teplotních gradientů);
- pro experimentální měření vždy používat nejmodernější měřicí přístroje;
- pro numerické analýzy používat (pokud možno) 3D výpočtové modely s elastoplastickým deformačním chováním materiálu.

6. ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo zefektivnit výpočetní metodiky pro predikci distorzí svařování velkých konstrukčních celků. Zefektivnění spočívá ve využití metodiky MBD pro provedení analýz lokálních 3D modelů pro tvarově složité konstrukce s žebry a výztuhy vedené přes svarové spoje. Na základě provedených MBD analýz byla postupně ověřena použitelnost MBD metodiky pro různé případy svařování (kap. 3). Použití MBD společně s LGA vytváří možnost efektivně predikovat distorze velkých svařovaných konstrukčních celků jakou je i svařovaná reaktorová nádoba fúzního reaktoru ITER. Na základě výsledků této disertační práce byl řešen projekt Evropské unie, jehož cílem bylo predikovat distorze svařovaných částí VVPSM nádoby fúzního reaktoru ITER (kap. 5) a následně byly navrženy potřebné kroky pro predikci distorzí 40° sektoru reaktorové nádoby. Použitím ověřené MBD metodiky bylo dosaženo uspokojivých výsledků řešení projektu za přijatelného výpočetního času a přijatelných hardwarových nároků. Výsledky disertační práce lze využít pro predikci distorzí velkých svařovaných součástí v energetickém a lodním průmyslu.

Metodiku predikce distorzí svařování velkých konstrukčních součástí pomocí MBD a LGA metodik lze obecně rozdělit do následujících kroků:

- 1) Provedení vhodně navržených (správná tuhost upnutí, vhodné měření smrštění apod.) tzv. validačních experimentů, které obsahují použité svarové spoje a technologie svařování na posuzované svařované součásti.
- 2) Úspěšné provedení numerických analýz validačních experimentů v bodě 1) pro naladění potřebných parametrů.
- 3) Provedení lokálních MBD analýz vybraných svarových spojů (ty jež mají významný vliv na deformační chování posuzované konstrukce) na skutečné svařované součásti dle výsledků v bodě 2).
- 4) Provedení globálních LGA analýz dle výsledků v bodě 3).

Je zřejmé, že numerické analýzy v současné době plně nenahradí experimentální měření. Je zapotřebí vždy provádět podpurné, validační experimenty a zároveň zlepšování výpočtových metodik. Numerické analýzy svařování je tak zatím třeba chápat jako účinnou pomůcku pro rozhodování. Nelze je brát jako jediný faktor pro konečné rozhodnutí o řešení daného technického problému. V současné době mají

numerické analýzy svařování především porovnávací charakter mezi navrhovanými variantami svařování tj. výběr optimální varianty. Dobré kvantitativní porovnání vyžaduje sérii experimentálních měření, detailní pochopení konkrétního svařovacího procesu, včetně zadání kvalitních vstupních dat a okrajových podmínek. Při řešení komerčních zakázek zatím není možné splnit tyto požadavky z časových a finančních důvodů, proto je důležité, aby byly doprovázeny vědeckými úkoly, které umožňují zkoumat složité technické detaily a tím splňovat neustále vzrůstající požadavky na kvalitu svařenců.

Seznam použité literatury

- [1] JUNEK, L.: Výpočet zbytkových napětí při svařování a tepelném zpracování, Disertační práce, Vojenská akademie v Brně, prosinec 1997
- [2] SLOVÁČEK, M.: Numerické simulace svařování výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí, Disertační práce, Univerzita obrany, fakulta vojenských technologií, katedra mechaniky a části strojů, Brno září 2005
- [3] DIVIS, V., SLOVACEK, M., OCHODEK, V., FLORYAN, J.: Evaluation of Welding Distortion of VV Poloidal Segment, Stage 1: Validation of Method, Experiments, Report IAM Brno No. 3616/04, October 2004
- [4] SLOVACEK, M., DIVIS, V.: Evaluation of Welding Distortion of VV Poloidal Segment, Stage 1: Validation of Method, Report IAM Brno No. 3586/04, October 2004
- [5] SLOVACEK, M., DIVIS, V.: Evaluation of Welding Distortion of VV Poloidal Segment, Stage 2 and 3: Local Models of Select Weld Joints, Global Model, Report IAM Brno No. 3617/04, October 2004
- [6] SLOVACEK, M., DIVIS, V.: Analysis of Welding Distortions Obtained in Manufacturing the VV Segment, Stage 1: Validation of Method, Experiments, Report IAM Brno No. 3815/05, December 2005
- [7] SLOVACEK, M., DIVIS, V., OCHODEK, V.: Analysis of Welding Distortions Obtained in Manufacturing the VV Segment, Stage 2: Numerical Analyse of VMO and LMVMO, Report IAM Brno No. 3816/05, December 2005
- [8] DIVIS, V., SLOVACEK, M.: Assessment of PSM Welding Distortions and Field Welding, Task 1: Modification of VMO and LMVMO Models, Report IAM Brno No. 4038/07, February 2007
- [9] SLOVACEK, M., DIVIS, V.: Assessment of PSM Welding Distortion and Field Welding, Task 2: Weld Joints Optimisation, Report IAM Brno No. 4031/07, February 2007
- [10] DIVIS, V.: Numerická analýza MKP v oblasti technologie svařování, Pojednání o budoucí disertační práci předkládané ke státní doktorské zkoušce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav, Duben 2006
- [11] RADAJ, D.: Welding Residual Stresses and Distortion - Calculation and Measurement, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2003, 397 s., ISBN 3-87155-791-9
- [12] 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.
- [13] Welding Theory and Application - Operator's Circular, Headquarters Department of the army, Washington DC, 7 May 1993, Training Circular No. 9-237, http://www.fortunecity.com/village/lind/247/weld_book/toc.htm
- [14] DIVIŠ, V., SLOVÁČEK, M., OCHODEK, V., VALENTA, M.: Numerické analýzy svaření nosníku, provedení svařovacích experimentů a jejich vyhodnocení, zpráva ÚAM s.r.o., archivní číslo 3737/05, červen 2005, Brno
- [15] Lincoln Electric, Prevention and Control of Weld Distortion, <http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/distortion.asp>
- [16] Distortion – Prevention by Pre-setting, Prebending or use of Restraint, Job Knowledge for Welders, The Professional Division of The Welding Institute http://www.twitraining/professional/protected/band_3/jk35.htm

- [17] Welding Procedures & Techniques, Distortion,
<http://www.weldingengineer.com/Distortion.htm>
- [18] MATHERS, G.: The Welding of Aluminium and its Alloys, Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, Cambridge England, 2002, 235 s., ISBN 0-8493-1551-4
- [19] THOMPSON, S.: Handbook of Mold, Tool and Die Repair Welding, William Andrew Publishing, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge England, 1999, 201 s., ISBN 1-884207-82-0
- [20] AMBROŽ, O., JUST, D., KUBÍČEK, J.: Teorie svařování – cvičení, Učební texty vysokých škol, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, Ediční středisko VUT Brno, 1990, 44 s., ISBN 80-214-0198-2
- [21] Střední uměleckoprůmyslová škola Turnov, Technologie uměleckého kovářství,
<http://konstrukce.webz.cz/sups/6tuko3.html>
- [22] KOLEKTIV AUTORŮ: Svářečský zpravodaj, Svařování konstrukcí, Vydává Česká svářečská společnost Praha, 44 s., únor 2005
- [23] MIKAMI, Y., MORIKAGE, Y., MOCHIZUKI, M., TOYODA, M.: Evaluation of Relationship Transformation Expansion of Weld Metal and Welding Distortion through Numerical Simulation Considering Phase Transformation Effect, International Institute of Welding, Prague 2005, IIW Doc.X-1582-2005
- [24] STEMVERS, M.: Výhody rúrkových drôtov, Zváranie – Svařování, Odborný časopis so zameraním na zváranie a príbuzné technológie, Vydáva Výzkumný ústav zvaračský Bratislava, ročník 50, 5-6 2001, ISSN 0044-5525
- [25] YANAGIDA, N.: Residual Stress Improvement in Multi-Layer Welding of Austenitic Stainless Steel Plates Using Water-Shower Cooling During Welding Process, International Institute of Welding, Québec City 2006, IIW XI-864-06
- [26] LI, J.: Localized Thermal Tensioning Technique to Prevent Buckling Distortion, Welding in The World, Journal of the International Institute of Welding, 2005, vol. 49, No. 11/12, ISSN 0043-2288
- [27] The Welding Simulation Solution, Summary of the Welding Offer ESI Group, ESI Group, February 2006
- [28] Sysweld Reference manual, ESI Group, January 2005
- [29] Sysweld Welding Advisor – General Presentation, ESI Group, 2005
- [30] VVPSM Local Models Validation Mock-up, Ansaldo Ricerche S.p.A., Genova 2005, 955-PSM-S-0012-00
- [31] Welding Procedure Qualification Record, Consorzio Rina-omeco, Genova 2005, R14102/1
- [32] Dimensional Check Report, VMO-Validation mock-up, Simic S.p.A., Genova 2005, 955-PSM-X-0002-00 Rev. 1
- [33] VVPSM Local Models Validation Mock-up – Welding and Measurement Test Report, Ansaldo Ricerche S.p.A., Genova 2005, 955-PSM-T-0004-00
- [34] DIVIS, V.: Assessment of PSM Welding Distortions and Field Welding, Task 3: PS1 and PS2 of VVPSM, numerical analyses and results comparison, Report IAM Brno No. 4082/07, June 2007
- [35] SLOVÁČEK, M.: Numerická analýza svaření kola 4,5JX14H2, zpráva ÚAM s.r.o., archivní číslo 3648/04, prosinec 2004, Brno
- [36] SLOVÁČEK, M., DIVIŠ, V.: Analýza procesu opravy závitového otvoru nátrubku HRK, zpráva ÚAM s.r.o., archivní číslo 3929/06, říjen 2006, Brno
- [37] SLOVÁČEK, M., DIVIŠ, V., OCHODEK, V., VALENTA, M.: Návrh technologie opravy kulového zásobníku T1101B, zpráva ÚAM s.r.o., archivní číslo 3945/06, říjen 2006, Brno

Curriculum Vitae

CONTACT INFORMATION

Name	Vladimir Divis
Address	Besuvka 15, 641 00 Brno-Zebetin
Country	Czech republic
Telephone	+420 511 111 799
Cell Phone	+420 776 070 953
Email	dvl@centrum.cz

PERSONAL INFORMATION

Date of Birth	5 May, 1979
Place of Birth	Kyjov, Czech republic
Citizenship	Czech republic
Gender	Male

EMPLOYMENT HISTORY

2003 - 2007

Institute of Applied Mechanics Brno, Ltd., Veveri 95, 611 000 Brno, Czech Republic,
Position description: Research worker in applied mechanics.

2007 - present

MECAS ESI, Ltd., Brojova 2113/16, 326 00 Plzeň, Czech Republic,
Position description: Technical worker

EDUCATION

High School

1993 - 1998

Integrated secondary school in Brno, Purkynova 97

Major: Operational electrotechnics

University

1998 - 2003

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Technicka 2

Major: Foundry Engineering

Degree: Master's degree

Doctoral study

2003 - 2007

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Technicka 2

Major: Welding and Heat Treatment Technology

PROFESSIONAL QUALIFICATIONS

Computer Skills

- CAD applications, AutoCad, Hypermesh, Pro/Engineer, SYSWELD

AWARDS

2003, First prize in diploma thesis competition (all of Czech technological universities)

PROFESSIONAL MEMBERSHIPS

Delegate for Czech Republic in IIW (International Institute of Welding)

LANGUAGES

English (intermediate)

PROFESSIONAL INTERESTS AND EXPERIENCES

- Lifetime evaluation of the components of nuclear power plants
- Evaluation of the weld joint
- Evaluation of the limit states
- Calculation and analysis of residual stresses after welding and heat treatment
- Optimization of welding and heat treatment processes
- Prediction of distortion in welding and heat treatment technology
- Thermo-metallurgical analyses in SYSWELD
- Mechanical-metallurgical analyses in SYSWELD

PROFESSIONAL INTERESTS AND EXPERIENCES IN DETAIL

Lifetime evaluation of the nuclear power plant components (such as steam generator, heat exchanger, reactor etc.) for limit state (thermo-mechanical fatigue) based on finite element calculations. Solving of thermal, elastic, elasto-plastic, thermo-elastic and thermo-plastic analyses.

Residual stresses evaluation after welding operations. Solving weld repairs of nuclear power plant components, pressure vessels and welded tubes. Numerical simulations of welding were performed using finite element method implemented in SYSWELD with respect to material phase transformations.

Solving several projects for automobile industry, e.g. optimization of welding and heat treatment of car wheels and welding of bus construction components.

In the last three years working for European Union on the field of design and verification of the welding technology for new thermo-nuclear reactor ITER, which is going to be built up in France. These projects are coordinated by EFDA Company (technical support for ITER) and are very prestigious. Projects for ITER consist of technical experiments, measurements of material properties, technical calculations and numerical analyses by SYSWELD. Having experience with designing of technical welding experiments and measurement methods.

Developing new methodology for distortion prediction on the field of big construction parts welding designed for heavy industry within my dissertation thesis. This thesis is close before finishing. This new methodology may be implemented into SYSWELD.

Abstract

One of the most important quantitative requirement for welding components is minimalisation of their distortions. The welding numerical analyses are established based on finite element method (FEM). The numerical analyses enable to prediction of welding distortions before welding. This dissertation thesis deals with possibilities how to effectively predict distortions (using newest solution approaches – macro bead elements and local global method) of big welded construction parts (mainly used in nuclear power plant and ship construction industry). There are described important fundamental terms as shrinkages, distortions and relative deformations. This thesis also deals with several factors which have significant influence on deformation behavior. The newest solution approaches of distortions prediction by using numerical analyses are presented on specific experimental examples which were chosen with regard to ITER fusion reactors vacuum vessel welding.