



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Simulace svařování dílu stavebního stroje

Welding simulation of miniexcavator

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Vondrouš Ph.D

Bc. Martin Bartoš

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Bartoš	Jméno:	Martin	Osobní číslo:	419856
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní				
Zadávací katedra/ústav:	Ústav strojírenské technologie				
Studijní program:	Strojní inženýrství				
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství				

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Simulace svařování dílu stavebního stroje

Název diplomové práce anglicky:

Welding simulation of miniexcavator

Pokyny pro vypracování:

1. Využití inženýrské simulace svařování v konstrukci stavebních strojů
2. Vytvoření CAD modelu, výpočtové sítě svařence, svarů
3. Stanovení okrajových podmínek
4. Definice zdroje tepla
5. Simulace v softwaru Simufact Welding
6. Verifikace výsledků simulace, porovnání s deformací reálného svařence

Seznam doporučené literatury:

Podklady firmy Doosan a MSC Software. Návod programu Simufact Welding.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Vondrouš, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **10.08.2018**


Platnost zadání diplomové práce: **10.08.2018**

 Ing. Petr Vondrouš, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	 doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)
--	---	--

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

4.5.2018 Datum převzetí zadání

 Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
Podpis

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Petru Vondroušovi Ph.D.,IWE za rady během vypracovávání této práce. Panu Ing. Přemyslu Němcovi Ph.D. z podniku Doosan Bobcat EMEA, s.r.o. za umožnění práce se softwarem Simufact.welding a Apex a Ing. Jakubu Sobkovi za pomoc při zhotovování experimentu. Dále panu Ing. Tomáši Majerovi za pomoc při měření dílce a vyhodnocení naměřených dat. Poděkování patří panu Ing. Pavlu Hurníku a Ing. Josefu Veverkovi ze společnosti MSC.Software za obětavou pomoc při řešení nejasností ohledně simulačního programu.

ANOTACE

Název práce: Simulace svařování dílu stavebního stroje

Autor: Martin Bartoš

Druh práce: Diplomová

Vedoucí práce: Ing. Petr Vondrouš Ph.D

Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze

Anotace

Cílem práce je vyzkoušení vhodnosti numerická simulace svařování vyráběného dílce transientní metodou při využití programu Simufact.welding pro možnost optimalizace technologičnosti konstrukce a návrhu svařovacích přípravků při tvorbě nového výrobního procesu nebo optimalizace. V první části je literální rešerše nutná k pochopení fungování numerické simulace. V praktické části je řešen celý proces simulace. Nejprve úprava modelu a zjištění vstupních dat pro numerickou simulaci. Následuje simulace několika variant. Pro ověření pravosti numerické simulace svařovacího procesu slouží podklady naměřených kusů svařenců, u kterých byl dodržen přesně daný postup tak jako v případě simulace.

Klíčová slova : Numerická simulace svařování, transientní metoda, predikce deformace

Rozsah práce : 96 stran

Počet obrázků : 69

Počet tabulek: 19

Počet grafů: 13

ANNOTATION

Thesis title: Welding simulation of miniexcavator

Author: Martin Bartoš

Type of work: Master

Supervisor: Ing. Petr Vondrouš Ph.D

Institute of Manufacturing Technology CTU in Prague

Annotation

The aim of this diploma thesis is to test the suitability of using numerical welding simulation of the chosen produced part. The simulation was run in program Simufact.welding. Firstly, were captured input data, which identifies defined welding process. In the first part, literary research is necessary to understand the operation of numerical simulations. The practical part deals with the whole process of simulation. First, modifying the model and finding input data for numerical simulation. Following is a simulation of several variants. To verify the authenticity of numerical simulation, data welded parts were gathered and the precise manufacturing procedure of the Bobcat company was strictly followed. The Bobcat company assume that numerical simulations could be used to optimize the construction of welded parts. Also, in the case of new welded parts it could help to optimize and improve the manufacturing process.

Key words: Welding simulation, transient method, deformation prediction

Scope of work: 97 pages

Number of pictures: 69

Number of tables: 19

Number of graphs: 13

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	11
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	13
SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ	13
1. ÚVOD	14
2. DOOSAN BOBCAT	15
3. NUMERICKÁ SIMULACE SVAŘOVACÍHO PROCESU	16
3.1. HISTORICKÝ VÝVOJ NUMERICKÝCH SIMULACÍ	16
3.2. METODY ŘEŠENÍ NUMERICKÝCH ANALÝZ SVAŘOVÁNÍ	17
3.2.1. <i>Metoda smrštění (SM)</i>	17
3.2.2. <i>Metoda makroelementů (MBD)</i>	18
3.2.3. <i>Lokálně-globální přístup (LGA)</i>	18
3.2.4. <i>Transientní metoda (TNA)</i>	18
3.3. TEPLTNĚ-METALURGICKÁ ANALÝZA	21
3.4. MECHANICKÁ ANALÝZA.....	23
3.5. VSTUPNÍ DATA PRO NUMERICKÉ SIMULACE SVAŘOVÁNÍ	23
4. TEPELNÝ ZDROJ PŘI SVAŘOVÁNÍ METODOU MIG/MAG.....	25
4.1. SVAŘOVACÍ OBLOUK	25
4.2. PRINCIP SVAŘOVÁNÍ METODOU MAG	26
4.3. PŘENOS KOVU METODOU MAG.....	27
5. NAPĚTÍ A DEFORMACE PŘI SVAŘOVÁNÍ.....	29
5. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	31
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
6.1. PLÁN EXPERIMENTU.....	34
6.2. URČENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO DÍLCE.....	35
6.3. URČENÍ SVAŘOVACÍHO PŘÍPRAVKU – OKRAJOVÉ PODMÍNKY	36
6.4. MODELOVÁNÍ SVARŮ.....	39
6.5. POPIS SVAŘOVACÍHO PROCESU	41
6.6. STEHOVÁNÍ SVAŘENCE.....	41
6.7. SÍŤOVÁNÍ MODELU.....	42
6.8. MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI PRO SIMULACE	51
6.8.1. <i>Ocel S235J2+N</i>	51
6.8.2. <i>Ocel A576 – 1018HR</i>	55
6.8.3. <i>Ocel S355J2G3</i>	55
6.9. DEFINICE TEPELNÉHO ZDROJE.....	59
6.9.1. <i>Rychlost svařování</i>	60
6.9.2. <i>Proud, napětí a účinnost</i>	61
6.9.3. <i>Rozměry tepelného zdroje</i>	61
6.9.4. <i>Naměřené hodnoty tepelného zdroje</i>	62
6.10. ČASOVÁ SEKVENCE A SMĚR SVAŘOVACÍHO ZDROJE	63
6.11. NASTAVENÍ ŘEŠIČE	65
7. PRŮBĚH SIMULACE S4.....	67
8. ANALÝZA VÝSLEDKŮ A MĚŘENÍ	79
8.1. MĚŘENÍ SVAŘENCE.....	79
8.2. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	84

9. PROBLÉMY PŘI SIMULACI	91
ZÁVĚR	93
POUŽITÁ LITERATURA	95

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Δl	poměrné proudloužení (smrštění)	[mm]
ΔT	změna teploty	[°C]
a_f	Přední délka tepelného zdroje	[mm]
A_{ij}	Množství i-té struktury, která transformovala na j-tou strukturu za jednotku času	[-]
a_r	Zadní délka tepelného zdroje	[mm]
ARA	Diagram anizotermického rozpadu austenitu	
b	Šířka tepelného zdroje	[mm]
c	Měrné teplo	[J/(kg.K)]
CAD	Computer aided design	
CPU	Central processing unit – centrální procesorová jednotka	
d	Hloubka tepelného zdroje	[mm]
f, n	Parametry určené z IRA diagramu při dané teplotě	[-]
IRA	Diagram izotermického rozpadu austenitu	
I_s	proud	[A]
k	součinitel účinnosti procesu.	[-]
l	původní délka	[mm]
LGA	Lokálně-globální přístup	
L_{ij}	Latentní teplot při transformaci fází	[J/kg]
MAG	Metal active gas	
MBD	Macro bead deposit	
MKP	Metoda konečných prvků	
$P_{eq,i}$	Podíl materiálové struktury P v rovnovážném stavu	[-]
P_i	Podíl vznikající materiálové struktury	[-]
P_m	Maximální podíl struktury při dané teplotě	[-][%]
q	Intenzita	[W]
Q	Zdroj tepla	[kJ/cm]
Re	Mez kluzu	[N/mm ²]
R_m	Mez pevnosti	[N/mm ²]
STEP	STandard for the Exchange of Product model data	
t	Čas	[s]
T	Teplota	[°C]
TMA	Tepelně-metalurgická analýza	
TNA	Transientní metoda	
U_0	napětí	[V]
v_s	rychlost svařování	[cm/min]
x	Souřadnice polohy na ose X	[mm]
y	Souřadnice polohy na ose Y	[mm]
z	Souřadnice polohy na ose Z	[mm]
α	Koeficient tepelné vodivosti	[m ² /s]
α	součinitel tepelné roztažnosti	[mm/(m.°C)]
ε	celková deformace	[1]
ε_e	elastická deformace	[1]
ε_p	plastická deformace	[1]
ε_{th}	teplotní deformace	[1]
ε_{tp}	transformační plasticita	[1]
λ	Měrná tepelná vodivost	[W/(m.K)]
λ	Měrná tepelná vodivost	[W/K.kg]
ρ	Hustota	[kg/m ³]

T_i

Ekvivalent časového zpoždění

[s]

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1. Závislost nákladů na čase během vývoje produktu [13].....	14
Obr. 2. Nakladač (vlevo) a rypadlo (vpravo) [1]	15
Obr. 3. Schéma výpočtu dle transientní metody [5]	19
Obr. 4. Oblasti svařovacího oblouku [25].....	25
Obr. 5. Princip svařování MAG [24]	26
Obr. 6. Zkratový přenos kovu [24]	27
Obr. 7. Přenos kovu a) kapkový b) sprchový [24].....	28
Obr. 8. Charakteristika svařovacích zdrojů [2].....	29
Obr. 9. Idealizovaná závislost napětí (σ) a deformace (ϵ) [25].....	30
Obr. 10. Kvádr (vlevo) a čtyřstěn (vprav) [10].....	31
Obr. 11. Struktura simulace svařování[13].....	34
Obr. 12. Umístění experimentální dílce v rámci stavebního stroje.....	35
Obr. 13. Experimentální dílec K2 RH Hinge – rozměry	35
Obr. 14. Experimentální dílec K2 RH Hinge - pozice.....	36
Obr. 15. Svařovací přípravek.....	36
Obr. 16. Model přípravku se založeným kusem	37
Obr. 17. Princip funkce clamping [13]	38
Obr. 18. Princip funkce bearing [14]	38
Obr. 19. Připravený model přípravku pro síťování.....	39
Obr. 20. Sekvence svarů	40
Obr. 21. Pozice stehů	42
Obr. 22. Síť dílu Pin hinge.....	43
Obr. 23. Síť dílu Plate hinge	44
Obr. 24. Síť dílu Plate spring gas.....	45
Obr. 25. Síť dílu Stop RH cover	45
Obr. 26. Síť dílu Plate hinge support.....	46
Obr. 27. Síťování dílu Plate hinge 2	47
Obr. 28. Síť svarů	48
Obr. 29. Síť svaru číslo 14 s tetragonálními prvky.....	49
Obr. 30. Síť sestavy	50
Obr. 31. Element quality analýza.....	50
Obr. 32. Goldakův model tepelného zdroje [19]	59
Obr. 33. Měření svarové lázně [21]	62
Obr. 34. Kontrola natočení svarové lázně.....	63
Obr. 35. Nastavení časové sekvence pro 1. Robota.....	64
Obr. 36. Nastavení časové sekvence pro 2. Robota.....	64
Obr. 37. Časová posloupnost celého simulačního procesu.....	65
Obr. 38. Detailní nastavení svařovací konvergence.....	66
Obr. 39. Detailní nastavení chladicí konvergence	66
Obr. 40. Rozdělení modelu na výpočetní podsestavy (domény)	66
Obr. 41. Simulace procesu v čase 20s – teplota.....	67
Obr. 42. Simulace procesu v čase 20s – deformace.....	67
Obr. 43. Simulace procesu v čase 20s - vnitřní napětí.....	68
Obr. 44. Simulace procesu v čase 20s – fáze.....	68
Obr. 45. Simulace procesu v čase 60s – teplota.....	69
Obr. 46. Simulace procesu v čase 60s – deformace.....	69
Obr. 47. Simulace procesu v čase 60s – vnitřní napětí	70
Obr. 48. Simulace procesu v čase 60s – fáze.....	70
Obr. 49. Simulace procesu v čase 95s – teplota.....	71
Obr. 50. Simulace procesu v čase 95s – deformace.....	71
Obr. 51. Simulace procesu v čase 95s – vnitřní napětí	72

Obr. 52. Simulace procesu v čase 95s – fáze.....	72
Obr. 53. Simulace procesu v čase 150s – teplota.....	73
Obr. 54. Simulace procesu v čase 150s – deformace.....	73
Obr. 55. Simulace procesu v čase 150s – vnitřní napětí	74
Obr. 56. Simulace procesu v čase 150s – fáze.....	74
Obr. 57. Simulace procesu v čase 200s – teplota.....	75
Obr. 58. Simulace procesu v čase 200s – deformace.....	75
Obr. 59. Simulace procesu v čase 200s – vnitřní napětí	76
Obr. 60. Simulace procesu v čase 200s – fáze.....	76
Obr. 61. Simulace procesu v čase 1300s – deformace.....	77
Obr. 62. Simulace procesu v čase 1300s – vnitřní napětí	77
Obr. 63. Simulace procesu v čase 1300s – fáze.....	78
Obr. 64. Simulace procesu v čase 1300s - tvrdost	78
Obr. 65. Cim core měřící rameno (vlevo) a detailní štítek měřícího zařízení (vpravo).....	79
Obr. 66. Definování měřených bodů.....	80
Obr. 67. Upnutí svařence na magnetický přípravek	81
Obr. 68. Zobrazení prvků pro potřeby vyrovnání v simulačním softwaru	81
Obr. 69. Vyrovnaná součást v simulačním softwaru	82
Obr. 70. Výsledek z měření prvku K005 simulace S1.....	83
Obr. 71. Výsledky měření prvku K005 simulace S1	83
Obr. 72. Prvek K008 (vlevo) a prvek K013 (vpravo)	86
Obr. 73. Neshodný prvek K005 v osách y a z	88
Obr. 74. Ukázka okrajových podmínek při svařování v přípravku.....	92
Obr. 75. Ukázka řešení okrajových podmínek při svařování "na stole"	92

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1. Urychlení výpočtu s využitím dělením na domény [12]	20
Tab. 2. Kusovník.....	36
Tab. 3. Kusovník svařovacího přípravku včetně působících sil [na základě dat od dodavatele upínek AMF].....	37
Tab. 4. Výsledek měření velikosti jednotlivých svarů.....	40
Tab. 5. Chemické složení oceli S235 [20].....	51
Tab. 6 Chemické složení oceli A576-1018HR [17].....	55
Tab. 7. Chemické složení oceli S355 [20].....	55
Tab. 8. Náměry ze svařování	60
Tab. 9. Vyhodnocení náměrů - stanové časových rozestupů svarů	61
Tab. 10. Parametry svařovacího procesu	62
Tab. 11. Základní nastavení řešiče.....	65
Tab. 12. Odlišnosti jednotlivých simulací	79
Tab. 13. Výsledky kalibrace měření	82
Tab. 14. Naměřené hodnoty svařených dílců.....	84
Tab. 15. Porovnání výsledků simulace S1 s náměry (hodnoty v mm)	85
Tab. 16. Porovnání výsledků simulace S2 s náměry (hodnoty v mm)	87
Tab. 17. Porovnání výsledků simulace S3 s náměry (hodnoty v mm)	89
Tab. 18. Porovnání výsledků simulace S4 s náměry (hodnoty v mm)	90
Tab. 19. Výsledná tabulka s obecným přehledem	91

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

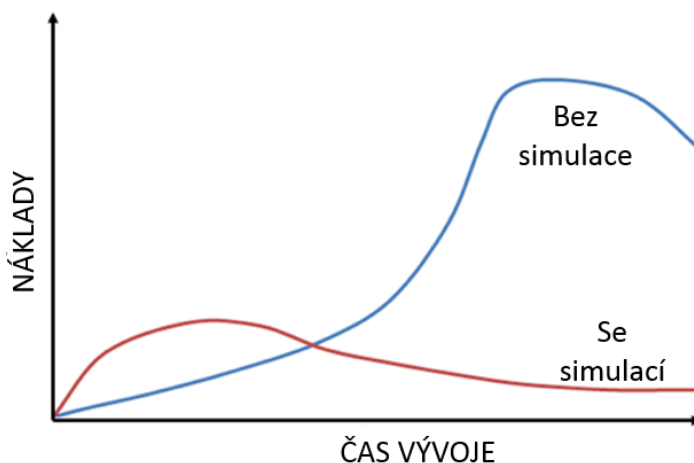
Graf 1. Závislost Youngova modulu na změně teploty pro ocel S235 [20]	52
Graf 2. Závislost tepelné vodivosti na změně teploty pro ocel S235 [20].....	52
Graf 3. Závislost specifické tepelné kapacity na změně teploty pro ocel S235 [20].....	53
Graf 4. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti na změně teploty pro ocel S235 [20].....	53
Graf 5. Tahový diagram za různých teplot pro ocel S235 [20]	54
Graf 6. ARA diagram pro ocel S235 [20].....	54
Graf 7. Závislost Youngova modulu na změně teploty pro ocel S355[20]	56
Graf 8. Závislost tepelné vodivosti na změně teploty pro ocel S355 [20].....	56
Graf 9. Závislost specifické teplotní kapacity na změně teploty pro ocel S355 [20]	57
Graf 10. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti na změně teploty pro ocel S355 [20].....	57
Graf 11. ARA diagram pro ocel S355 [20].....	58
Graf 12. ARA diagram pro ocel S355 [20].....	58
Graf 13. Tahový diagram za různých teplot pro ocel S355 [20]	59

1. ÚVOD

V průmyslu jsou dnes úspěšní ti, kteří dokáží pružně reagovat na měnící se trendy na trhu a přizpůsobit se jim. Rychlá reakce, spolu s rychlou výrobou kvalitních a finančně zajímavých produktů, předurčuje podnik k úspěchu. Výroba nových komponentů, či celého výrobního celku, za sebou nese nemalé vstupní investice. Klasický model optimalizace inovovaných výrobků obnáší vytvoření pilotních dílů, které se musejí testovat, měřit a validovat. Možnost jak optimalizovat výrobu ještě před fyzickým započítím, a tím výrazně ponížit vstupní investice, je využití simulací výrobního procesu.

Simulace svařování snižují zejména časové a finanční nároky na výrobu nových produktů. Snížení časové náročnosti je dáno odhalením fundamentálních nedostatků, jak na straně konstrukce, tak i technologie, již ve vývoji dílce. Uspořený čas a peníze se zejména projeví při zpětném zásahu do výroby. V tomto případě jsou to náklady na opravu svařence (broušení, dovařování)

Důsledná příprava ve fázi vývoje produktu (s vyššími počátečními náklady) na konci přinese značné úspory podniku, a tím i možnost levněji vyrábět s požadovanými podmínkami na kvalitu výrobku. Vztah nákladů během procesu vývoje při využití simulace (červená) a bez simulace (modrá) zobrazuje Obr. 1 [1]



Obr. 1. Závislost nákladů na čase během vývoje produktu [13]

Smyslem této práce je vyzkoušení simulací svařování na reálném dílci v podniku Doosan Bobcat EMEA. s.r.o, ve kterém se tyto simulace dosud nevyužívají. Důraz je kladen zejména na vyzkoušení vhodnosti softwaru pro výpočet deformací a ověření pravosti analýzy. Správnost simulace je ověřena na 8 kusech dílce, u něhož byl dodržen definovaný výrobní postup. Simulace by měly sloužit jako pomocný nástroj při optimalizaci konstrukčního řešení již vyráběných svařenců a ověření správnosti technologického řešení pro nově vznikající výrobky.

2. DOOSAN BOBCAT

Kořeny společnosti Bobcat sahají až do roku 1947, kdy v Severní Dakotě ve městě Gwinner v USA založil E. Gideon Melroe společnost Melroe Manufacturing Company. V roce 1958 zahájila firma Melroe výrobu stroje Bobcat model M-200. Od roku 1995 byla společnost Bobcat součástí celosvětové firmy Ingersoll Rand. Společnost Ingersoll Rand prodala v červenci 2007 společnost Bobcat společně s dalšími dvěma divizemi korejské společnosti Doosan Infracore za 4,9 miliardy dolarů (asi 98 miliardy Kč). Jednalo se o největší zámořskou akvizici v korejské historii. Doosan Infracore se tak dostal mezi sedm největších světových výrobců stavebních strojů. Společnost Bobcat se specializuje na výrobu malých kompaktních stavebních strojů. [1]

Společnost Bobcat má vlastní závod v České Republice, v Dobříši. V portfoliu výroby společnosti Doosan Bobcat EMEA. s.r.o. jsou zejména 2 typy stavebních strojů. Smykem řízený nakladač tzv. loader sériové řady S70, S100, S450, S510, S530, S570 a S590. Druhým zástupcem je minibagr, či kompaktní rypadlo, ta se vyrábí v 10 kategoriích – malá a střední E17, E19, E20, E25, E26 (do 3 tun) a velká E32, E35, E45, E50, E55 (do 6 tun), Obr. 2. Každým rokem Doosan Bobcat EMEA produkuje kolem 18 tis. kusů strojů jak nakladačů, tak rypadel. [2]



Obr. 2. Nakladač (vlevo) a rypadlo (vpravo) [1]

3. NUMERICKÁ SIMULACE SVAŘOVACÍHO PROCESU

Svařování patří mezi vysoce produktivní metody výrobní technologie spojování materiálu. Své uplatnění našlo téměř v každém průmyslovém odvětví. Zároveň rostou nároky na kvalitu svarových spojů. Největší požadavky sledujeme zejména v energetickém průmyslu. Pozadu nezůstává ani automobilový, letecký či lodní průmysl. Právě podrobná znalost procesů potřebných k provedení správné simulace zvyšuje možnosti zlepšení kvality svarových spojů.

K dosažení správné simulace svařovacího procesu je nutná podrobná znalost všech aspektů vstupujících do procesu. Mezi hlavní aspekty svařovacího procesu řadíme materiálové a fyzikální vlastnosti. Dalším zdrojem informací je výkresová dokumentace, jež slouží k vytvoření 3D modelu, který je vázán s grafickým výstupem analýzy.

Simulační softwary, nejen pro svařování, mohou pracovat s více metodami popisující analyzovaný prvek. Známé jsou 2 metody, metoda konečných objemů a metoda konečných prvků. Druhá metoda, metoda konečných prvků, je vhodná pro analýzu při kterých dochází k fázovým přeměnám. Tato metoda je v této práci využívána. [3,4]

3.1. HISTORICKÝ VÝVOJ NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Během posledních let bylo publikováno mnoho odborných prací týkajících se simulací svařování. Můžeme je rozdělit do následujících skupin.

1. Vývoj modelů tepelných zdrojů,
 - a. analýza dějů probíhajících v oblasti elektrického oblouku,
 - b. definice správného modelu tepelného zdroje pro příslušnou metodu svařování.
2. Simulace svařování – simulace s cílem predikce vzniklé struktury svařence a měření zbytkových napětí spolu s deformací svařence
3. Posouzení životnosti svařence s ohledem na zatěžování (únava materiálu)

Prvním pokusem o určení zbytkových napětí a deformace byly práce provedené Rodfersem a Fletchrem v roce 1938. Experiment spočíval v použití analytické rovnice na základě lineární skořepinové teorie se zahrnutím vlivu teplotní historie. Výstupem experimentu byl předpoklad existence ohybové složky napětí přes tloušťku stěny trubky.

Do roku 1970 bylo zjištěno několik analytických postupů pro predikci zbytkových napětí a deformaci po svařování. Výsledky uvedené Masubuchim dobře odpovídaly naměřeným jednoduchým případům jednovrstvého svařování. Masubuchy tak vytvořil rovnice pro stanovení zbytkových napětí a deformací pro jednoduché modely. Jedním z výstupů bylo zjištění, že v případě podélného svařování je podélné napětí, krom míst na počátku a konci svařenců, neměnné a odpovídá hodnotě meze kluzu. Platí pro předpoklad materiálu bez

zpevnění. Zjištěné informace neplatí pro příčné napětí (kolmé na směr svařování). To je závislé mnoha proměnnými, řadíme sem technologii svařování, geometrii svarových ploch a způsob upnutí desek (okrajové podmínky).

Pánové Quem, Michaleris a Sun se v roce 1980 zabývali svařováním lodí. Na základě jejich práce bylo konstatováno, že dominantní vliv na zbytkové napětí mají zejména okrajové podmínky, druh deformace a stav napjatosti.

Během posledních 20 let bylo vytvořeno několik programů pro numerickou simulaci svařování. Většina z nich je založena na metodě konečných prvků. Dnes se numerické analýzy věnují i řešení strukturních transformací a rovněž tzv. transformační plasticity, zřejmě při překrystalizaci krystalové mřížky.

Dnešní softwary, pracující se simulacemi svařovacího procesu, dokáží do vysoké míry přesně předpovídat zbytkové napětí, deformace, určení tepelně ovlivněné oblasti, či struktury ve svarovém kovu.[5]

3.2. METODY ŘEŠENÍ NUMERICKÝCH ANALÝZ SVAŘOVÁNÍ

Samotné simulační programy umožňují více metod postupu výpočtu. Mezi tyto metody patří:

1. Metoda smrštění (SM)
2. Transientní metoda makroelementů (MBD)
3. Lokálně-globální přístup (LGA)
4. Transientní metoda (TNA)

3.2.1. Metoda smrštění (SM)

Prvotním předpokladem metody je objemové smrštění kovu při chladnutí. Metoda je určena pro rychlý odhad deformací jednoduchých svařenců zejména v automobilovém průmyslu. Analyzovaný model se skládá pouze z elementů skořepinové sítě. Díky ní vznikne menší počet výpočetních uzlů, což obnáší urychlení analýzy. Nevýhodou je, že se špatně definuje vícevrstvý svarový spoj. Princip spočívá v určení oblastí, ve kterých dojde ke smrštění. To je definováno jako přídavné napětí tzv. „fiktivní teplotou záporného charakteru“ do postižených uzlů. Správným rozdělením smrštění lze přesně simulovat pohyb svařovacího zdroje.

Výpočet je rychlý díky skořepinovým prvkům. Výsledky nejsou tak přesné jako u transientní metody, neobsahují výstupy o teplotním zatížení, nezahrnují všechny materiálové vlastnosti důležité pro precizní svařovací analýzu. [7]

3.2.2. Metoda makroelementů (MBD)

Metoda makroelementů (MBD- macro bead deposit) se zásadně neliší od transienční metody. Rozdíl spočívá v provedení teplotní analýzy. Ta probíhá tak, že vnesené teplo je vloženo do celého objemu housenky. Díky této metodě dochází ke snížení potřebného času na výpočet a tvorbu výpočtových modelů.

Výhodou přístupu MBD je ulehčení pracnosti síťování (není potřebná jemná síť v okolí svarů). Se snižujícím se počtem prvků roste rychlost výpočtu, což umožňuje využití při svařování větších kusů, než pro metodu TNA. Nevýhodou je snížená kvalita simulace a omezení velikosti svařovaného dílce. [7]

3.2.3. Lokálně-globální přístup (LGA)

Nová metoda, která je zaměřená na svařování rozměrově velkých dílců. Metoda je založena na rovnováze vnitřních sil. Tento přístup kombinuje TNA či MBD a elastické analýzy globálního modelu. Ten je rozdělen na dvě části. Nejdříve se přistoupí k tzv. lokálnímu přístupu, což je klasická transienční metoda, ve které se analyzují svarové spoje. Dále se vytvoří komplexní model konstrukce (globální přístup) včetně všech svarů. Deformace vzniklé z transienční analýzy jednotlivých svarů jsou globálně použity na celou konstrukci. Takto vzniklé deformace s sebou přenášejí vnitřní sílu, která působí na konstrukci. Na závěr je provedena elastická analýza globálního modelu a jejím výstupem jsou posuvy (deformace) analyzované konstrukce. [5,7]

3.2.4. Transienční metoda (TNA)

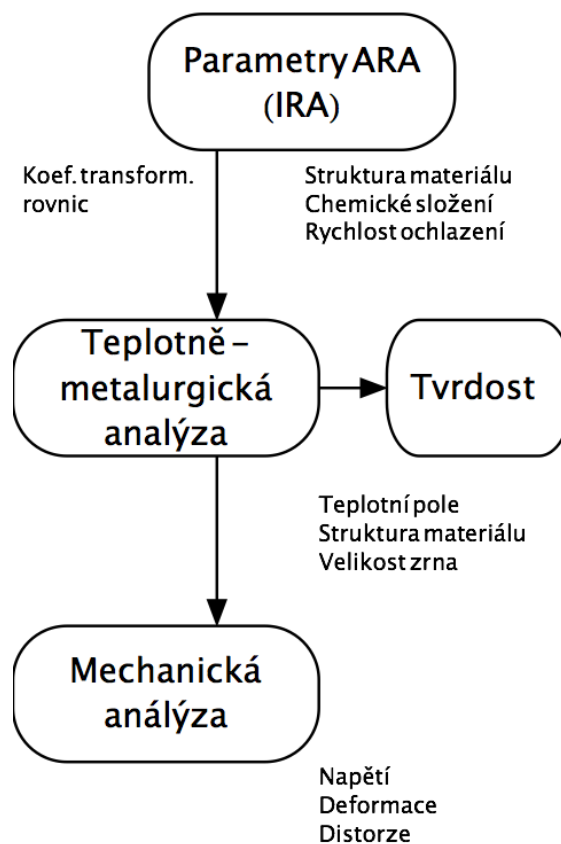
Transienční metoda je založena na kompletní simulaci výrobního procesu. Jedná se o základní metodu analýzy s pohybujícím (transienčním) se tepelným zdrojem. Chronologicky kopíruje skutečný výrobní postup. Důraz je kladen na správné nastavení svařovací sekvence jednotlivých housenek. Vnesené teplo odpovídá skutečnosti díky přesnému matematickému modelu, kdy je simulace pohybu závislá na čase a souřadnicích prostoru. Tato metoda vyžaduje jemnou síť prvků zejména v oblasti svarů.

Celá transienční metoda obsahuje 3 části.

1. Pomocí modulu určeny vstupní materiálové charakteristiky z ARA nebo IRA diagramů.
2. Vstupní data jsou použita pro výpočet teplotně-metalurgické analýzy. Z uvedeného získáme informace o teplotním poli, rozložení fází, tvrdosti struktury a velikosti zrna.

3. Poslední částí je mechanická analýza, jejíž výstupem je napětí, deformace analyzovaného celku.

Viz Obr. 3.



Obr. 3. Schéma výpočtu dle transientní metody [5]

Z hlediska fyzikálních dějů se předpokládá, že mechanická analýza neovlivní analýzu teplotní. Tedy, že změny napětí (deformací) v materiálu nemají vliv na teplotu svařence. Naopak změna teploty svařence vliv na napětí (deformace) má. Jedná se o jednosměrnou spojitost. Díky níž je nedřívě vypočítávána teplotně-metalurgická analýza (TMA). Výsledky TMA (teplotní pole) jsou následně využity v mechanické analýze.

Dle Francise je teplo vzniklé deformací, oproti teplu vnesenému svařovacím zdrojem, několikanásobně menší. Vzhledem k tomu můžeme provádět TMA analýzu odděleně od mechanické.

Protože tato metoda přesně vystihuje trvání a časovou sekvenci všech dějů, tak jak probíhají ve skutečnosti, přináší nám nejpřesnější výsledky. Bohužel tato metoda je velmi závislá na době výpočtu, a tudíž je její využití vhodnější na menší díly s menším počtem

svarů. Pro simulaci svařování je tato metoda jednou z variant, avšak pro tepelné zpracování je to doposud jediná možnost.

Pro výpočet je požadováno využití tzv. DMP výpočtového řešiče (DMP-distributed memory parallel, nebo-li DDM Domain Decomposition Method), které výrazně snižují výpočetní čas, oproti SPM řešiči (SPM-Shared Memory Parallelization)

DMP/DDM – rozdělí svařovací sestavu na určitý počet podsestav (domén), které jsou spolu provázány. Takto vzniklá doména je počítána odděleně na přiřazeném počtu jader CPU, nicméně jsou všechny počítané zároveň.

SPM – umožňuje jednomu řešiči využívat více jader CPU. To rozmístí sestavu a řešení v systému matice na několik jader CPU sdílející stejnou výpočetní paměť.

Využívá se obou prostředků paralelizace jak DMP/DDM, tak i SPM. Například můžeme využít dělení na 4 domény (DDM) a ke každé doméně přiřadit 2 jádra (SPM). Příklad urychlení výpočtu s využitím dělení DMP verze a bez využití dělení (pouze SMP) zobrazuje Tab. 1.

	Počet jader	Urychlení řešení
SMP verze	1	1
DMP verze	2	1,85
DMP verze	4	3,21
DMP verze	8	5,26
DMP verze	16	7,68
DMP verze	32	8,73

Tab. 1. Urychlení výpočtu s využitím dělení na domény [12]

S transienční metodou s využitím domén je nadále pracováno.

Detailní popis postupu výpočtu transienční metodou je popsán v následujících kapitolách. [4,5,6,7,12,21]

3.3. TEPLOTNĚ-METALURGICKÁ ANALÝZA

Na základě této analýzy, jako jsou rozložení teplotních polí v čase a prostoru, rychlost ohřevu, či ochlazení, se zjišťuje i strukturní část, do které řadíme přeměnu materiálových fází.

Při svařovacím procesu se vlivem rychle vneseného tepla mění teplota v širokém rozsahu. Díky přívodu tepla vzniká v základním materiálu teplotní pole.

$$T = f(x, y, z, t) \quad (3.3.1)$$

Teplota v daném místě základního materiálu je funkcí souřadnic a času (3.3.1) a vzniká tak nestacionární teplotní pole. Pro určení vedení tepla v oblasti svaru a charakteru teplotního pole se využívají základní diferenciální Fourierovy rovnice (3.3.2).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha \nabla^2 T \quad (3.3.2)$$

c – měrné teplo [J/(kg.K)]

q – intenzita [W]

α – koeficient tepelné vodivosti [m²/s]

λ – měrná tepelná vodivost [W/(m.K)]

ρ – hustota [kg/m³]

Nejčastějším modelem popisující kinetiku transformačních přeměn je tzv. Johnson-Mehl-Avramiho zákon (3.3.3). Tento zákon definuje kinetické závislosti při transformaci fází a předpovídá podíl vzniklé struktury P_i . Vztah je navíc funkce času při dané teplotě.

$$P_i(T, t) = P_m (1 - \exp(-(ft)^n)) \quad (3.3.3)$$

Určuje podíl vznikající struktury, jenž je funkcí času při dané teplotě

P_i : podíl vznikající struktury

P_m : maximální podíl struktury při dané teplotě

t : čas [s]

T : teplota [°C]

f, n : parametry určené z IRA diagramu při dané teplotě

Rychlost změny teploty v čase je proměnlivá, tak jako teplota během svařování. Z tohoto důvodu byl Johnson-Mehl-Avramiho zákon upraven Leblondem o časové zpoždění transformačních jevů vůči rovnovážnému stavu (3.3.4). Tato úprava, jenž zahrnuje poloempirický vztah zachovává kinetiku přeměn, a také zaznamenává ARA diagram v celém objemu chlazení. Tento vztah je možné zapsat rovnicí. (3.3.4)

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{P_{eq,i} - P_i}{\tau_i} \quad (3.3.4)$$

Kde

P_i : podíl materiálové struktury [-]

$P_{eq,i}$: podíl materiálové struktury P v rovnovážném stavu [-]

T_i : ekvivalent časového zpoždění [s]

Pro výpočet teplotně metalurgické analýzy je využita klasická rovnice vedení tepla, která je modifikována vlivem zahrnutí transformačního tepla a latentního tepla při transformaci fází. Takto upravená rovnice má konečný vztah (3.3.5): [5,8]

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \text{grad}T - Q + \sum_{i=1}^n L_{ij} \cdot A_{ij} = 0 \quad (3.3.5)$$

L_{ij} : latentní teplot při transformaci [J/kg]

A_{ij} : množství i-té struktury, která transformovala na j-tou strukturu za jednotku času [-]

c : měrné teplo [J/kg.K]

λ : měrná tepelná vodivost [W/K.kg]

ρ : hustota [kg/m³]

Q : zdroj tepla [W]

Díky výpočtu teplotně-metalurgické analýzy můžeme odhadnout konečnou tvrdost materiálu. Výpočet tvrdosti je prováděn na základě empirických vztahů. Na základě těchto informací můžeme určit mez pevnosti (Rm), či mez kluzu (Re). Dalším výsledkem teplotně-metalurgické analýzy je určení velikosti austenitického zrna.

Smyslem simulace těchto stavů je dosažení přesných výsledků tak, aby popisovaly reálný stav, či se mu blížily. Nesmíme zapomínat na řadu omezujících předpokladů, které snižují přesnost simulace a to z toho důvodu, aby bylo možné úlohu vůbec matematicky vypočítat. Výsledek simulace je závislý na kvalitě vstupních dat a je nutné se jim více věnovat. Proto výstup simulace stojí a padá s kvalitou vstupních dat a jejich množstvím. Vstupní data pro výpočet teplotně-metalurgické analýzy můžeme rozdělit do tří základních složek. [5,8]

- MATERIÁLOVÁ VSTUPNÍ DATA
- DEFINICE A POPIS TVARU TEPELNÉHO ZDROJE
- VYTVOŘENÝ SIMULAČNÍ MODEL

3.4. MECHANICKÁ ANALÝZA

Mechanická analýza, jak už bylo zmíněno, vychází z výsledků teplotních polí, které proběhly výpočtem teplotně-metalurgické analýzy.

Cílem řešení je zjištění velikosti napětí, poměrných deformací v průběhu a na konci svařovacího děje. Teplotní pole jsou v daném časovém okamžiku jedinou deformační silou pro mechanickou část. Přeměny fází během procesu jsou hlavní faktory ovlivňující výsledné mechanické vlastnosti. Výpočet je proveden pro každý uzel a element jehož výsledkem jsou napětí a deformace v analyzovaném bodě (metoda konečných prvků, viz kap. 4). Celková poměrná deformace je získávána z Leblondova zákona (3.4.1)

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p + \varepsilon_{tp} \quad (3.4.1)$$

kde:

ε : celková deformace [1]

ε_e : elastická deformace [1]

ε_{th} : teplotní deformace [1]

ε_p : plastická deformace [1]

ε_{tp} : transformační plasticita [1]

Řešení deformací a napětí se odehrává v nelineární elasticko-plastické oblasti s uvažováním velkých deformací. Dnešní simulace mechanické analýzy se odebírají směrem vyskoplastického modelu.

Výstupem mechanické analýzy je velikost prostorové napjatosti elastické i plastické deformace. Vektory posunutí jednotlivých bodů, složky tenzoru napětí i tenzoru deformace, hlavního napětí i deformace ve směru hlavních napětí, jsou počítány pro Trescovu teorii i teorii HMM. Vstupní data pro výpočet mechanické analýzy:

- MATERIÁLOVÁ VSTUPNÍ DATA (TAHOVÉ DIAGRAMY ZA RŮZNÝCH TEPLIT)
- MÍSTO UPNUTÍ SVAŘENCE DEFINOVÁNO SILOU A TUHOSTÍ
- MODEL PRO SIMULACI ZPEVNĚNÍ

[5,6,8]

3.5. VSTUPNÍ DATA PRO NUMERICKÉ SIMULACE SVAŘOVÁNÍ

Účelem této kapitoly je přinést přehled potřebných vstupních dat pro práci s numerickými simulacemi.

Tepelně-metalurgická analýza

- Materiálová data určující vlastnosti materiálu v rozmezí teplot probíhající během svařování

- Popsání zdroje tepla, jeho parametry a intenzitu
- Počáteční a okrajové podmínky pro výpočet vedení tepla
- Model svařence popsaný metodou konečných prvků

Mechanická analýza

- Materiálová data s vlastnostmi za různých teplot
- Výstupní data z tepelně-metalurgické analýzy
- Popsání zdroje tepla, jeho parametry a intenzitu
- Model svařence popsaný metodou konečných prvků

Pan Langer ve své práci „Vlastnosti materiálů jako vstupní data pro simulaci svařování“ uvádí následující materiálové vlastnosti potřebné pro simulaci.

Tepelně-metalurgická analýza

- Součinitel tepelné vodivosti – λ
- Měrná tepelná kapacita – c
- Hustota - ρ
- Koeficient přestupu tepla – U
- ARA diagram

Výsledkem je

- Výpočet nestacionárních teplotních polí v prostoru a čase
- Rozložení fází v průběhu svařovacího procesu
- Výpočet tvrdosti a velikost austenitického zrna

Mechanická analýza

- Poissonova konstanta – γ
- Koeficient teplotní roztažnosti – α
- Modul pružnosti E
- Deformační zpevnění materiálu – tahový diagram za různých teplot a fází

Výsledkem je

- Výpočty zbytkových napjatostí a elastických i plastických deformací
- Výpočty jednotlivých složek tenzoru napětí (normálová a smyková napětí)
- Výpočty trojosého stavu napjatosti [3,9]

4. TEPELNÝ ZDROJ PŘI SVAŘOVÁNÍ METODOU MIG/MAG

Tepelným zdrojem se rozumí elektrický oblouk, který hoří během mezi koncem tavicí se elektrody (drátu) a základního materiálu v prostředí ochranného plynu. Obloukové svařování tavicí se elektrodou patří ve svařečské praxi k nejčastější metodě spojování materiálu, tzv. nerozebíratelným spojem. Do této skupiny patří mj. svařování metodou MAG a MIG. Podle chemického plynu použitého během procesu dělíme na:

A. svařování MIG (Metal Inert Gas) – zde se využívá chemicky nereaktivních plynů, jako jsou Argon, či směsi Argonu s Heliem

B. svařování MAG (Metal Active Gas) – zde se plyn aktivně účastní chemické reakce.

Využívá se plynů převážně s oxidačním charakterem (oxid uhličitý, $\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{Ar}+\text{O}_2$).

V této práci se zabývá pouze metodou MAG jež je stěžejní pro svařování v podniku. [24,25]

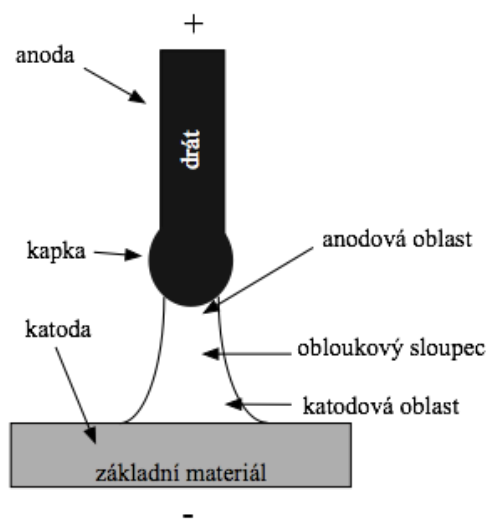
4.1. SVAŘOVACÍ OBLOUK

Je trvalý ionizační proces, nebo také zvláštní forma elektrického výboje v plynu. Specifické vlastnosti získává ze skutečnosti, že plynové prostředí, ve kterém dochází k trvalému výboji, tvoří nejen použitý ochranný plyn, ale i páry kovů ze základního a přídavného materiálu. V některých dokumentech se uvádí, že elektrickou vodivost obloukového sloupce zajišťují hlavně kovové páry a že disociace a ionizace ochranných plynů má pouze druhořadý charakter. Z toho plyne, že vliv na stabilitu oblouku má i základní materiál.

Metodou MAG se nejčastěji spojují nelegované, nízkolegované a vysokolegované oceli. [24,25]

Každý elektrický oblouk má 3 základní oblasti, viz Obr. 4.

- Anodová oblast (při povrchu anody +),
- obloukový sloupec,
- katodová oblast (při povrchu katody -).

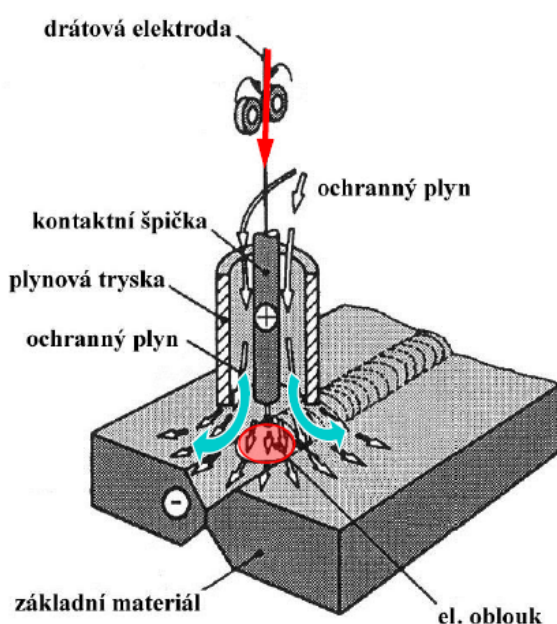


Obr. 4. Oblasti svařovacího oblouku [25]

Svařovací oblouk, který je hlavním zdrojem tepla, není uchopitelný pro výpočetní program. Softwary tedy pracují s velikostí tavné lázně, která je závislá na základních parametrech procesu (proud, napětí, rychlost a účinnost). Velikost tavné lázně se nejlépe zjišťuje z příčného makrovýbrusu.

4.2. PRINCIP SVAŘOVÁNÍ METODOU MAG

Svařování metodou MAG řadíme mezi metody tzv. tavného svařování. Natavením svařovacích ploch základního materiálu a odtavením přídavného materiálu (tavící se elektrody) vznikne svarová lázeň. Ta vytváří požadovanou fyzikální vazbu materiálů. Pevnost vazby mezi svarovými plochami se během chladnutí zvyšuje.



Obr. 5. Princip svařování MAG [24]

Zapálení oblouku

Při svařování metodou MAG se oblouk zapaluje nejčastěji zkratem. Zkrat nastane, pokud se odtavující elektroda (drát) dostane do kontaktu s povrchem svařovaného materiálu.

Podmínky zapálení oblouku (vybuzení ionizačního děje) jsou závislé na

- na ionizační energii tavící se elektrody (drátu),
- na průměru a druhu drátu a základního materiálu,
- statických a dynamických charakteristik svářecího zdroje,
- na druhu proudu a polaritě tavící se elektrody,
- na velikosti svářecího proudu.

4.3. PŘENOS KOVU METODOU MAG

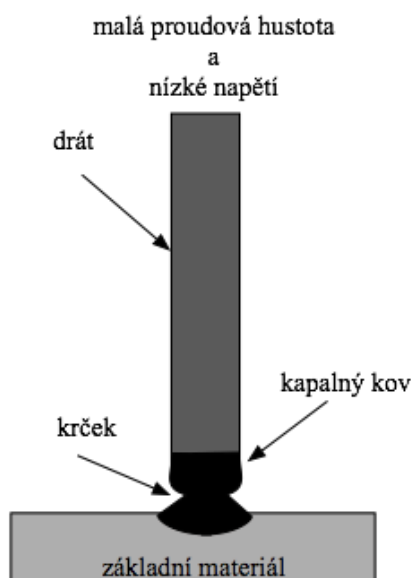
Formu a rozměr svarové lázně ovlivňuje v první řadě základní parametry svařování:

- velikost svařovacího proudu,
- velikost napětí,
- rychlost svařování,

Pro přesnější definici se zavedl pojem proudová hustota [A/mm^2], značí velikost proudu připadající na jednotku průřezu tavicí se elektrody. Ta je spolu s výškou napětím určujícím faktorem přenosu kovu v oblouku. Při zvyšování proudové hustoty dochází ke změnám přenosu kovu, tento rozsah definují autoři jako mezní proudovou hustotu. Tato hodnota není konstantní a změna typu přenosu kovu je pozvolná. Je ovlivňována přídavným materiálem a druhem ochranného plynu.

Základní typy přenosu materiálu

- **Zkratový přenos (90-150A)** – definován nízkým napětím na oblouku max. 22 V a malou proudovou hustotou (svařovací proud není vyšší než 200A). Přenos obsahuje 2 fáze. První fáze je zkrat a druhá hoření oblouku. V první fázi dochází k ohřevu převážně drátu, ve druhé se ohřívá základní materiál. Viz Obr. 6. Využití při svařování materiálů menších tloušťek.

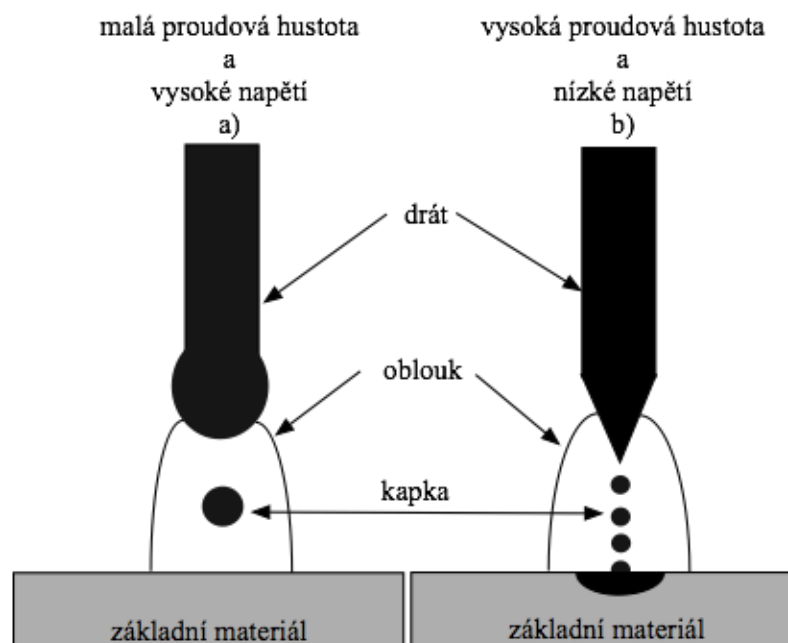


Obr. 6. Zkratový přenos kovu [24]

- **Přenos bezzkratový (200-500A)** – se vytváří při dlouhém oblouku (při vysokém napětí 25-35 V). Dle proudové hustoty můžeme přenos rozdělit do více variant.

- **Kapkový přenos** – nízká proudová hustota, drát se odtavuje nerovnoměrně ve formě kapek větších rozměrů. Kapky se oddělují výlučně vlastní vahou (působením gravitační síly). Viz Obr. 7a.

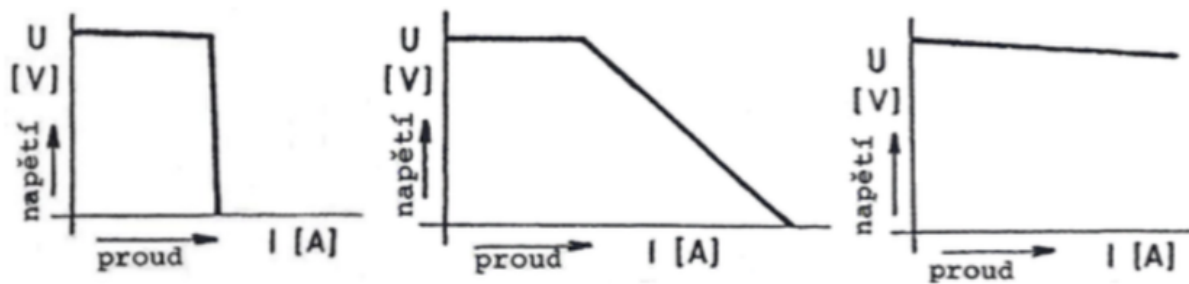
- **Sprchový přenos** – Vysoká proudová hustota (vyšší než mezní hodnota). Kapky jsou menší a oddělují se vlivem působení elektromagnetických sil (tzv. pinch efektu). Viz Obr. 7b. Využití při svařování materiálů středních a větších tloušťek.
- **Impulzní přenos** – kombinace mezi kapkovým a sprchovým přenosem, využívající jednosměrný proud pulzující mezi 2 hodnotami základního a impulzního proudu v nastavené frekvenci (25-100Hz). Využití při svařování materiálů menších tloušťek.
- **Přenos rotujícím obloukem** – výrazně vyšší hodnoty než je mezní hodnota proudové hustoty. Využití při robotickém svařování materiálů velkých tloušťek a při vysokovýkonnostním navařování. [24,25]



Obr. 7. Přenos kovu a) kapkový b) sprchový [24]

- **Polozkratový přenos** – kombinace zkratového a bezzkratového přenosu, realizovaný v přechodové oblasti. Napětí na oblouku v rozmezí 18-25 V.

Při svařování v ochranných atmosférách se využívá zdroj se stejnosměrným proudem a s kladným pólem na odtavující se elektrodě. Jedná se o nepřímou polaritu zapojení. Pro usměrnění proudu se využívají inventory. Metoda MAG užívá zdroj s plochou charakteristikou. Ta je dána konstantním napětím a schopností udržet stejnou délku oblouku. Viz Obr. 8. [2]



1) Strmá charakteristika 2) mírně klesající (kombinovaná charakteristika) 3) plochá charakteristika

Obr. 8. Charakteristika svařovacích zdrojů [2]

5.5. NAPĚTÍ A DEFORMACE PŘI SVAŘOVÁNÍ

Během svařování vniká do materiálu tepelná energie, díky níž vznikají napětí, které přecházejí z elastického na plastický stav. Při volbě metody svařování je důležité zahrnout vliv tepelného příkonu do svařence. Tepelný příkon se vypočítá ze vztahu:

$$Q = k \frac{60 \cdot U_0 \cdot I_s}{1000 \cdot v_s} \left[\frac{kJ}{cm} \right] \quad (5.5.1)$$

kde:

Q : tepelný příkon [kJ/cm]

U_0 : napětí [V]

I_s : proud [A]

v_s : rychlost svařování [cm/min]

k : součinitel účinnosti procesu.

K deformacím dochází pokud je překročena mez elasticity. Tím se rozumí, že pokud vnitřní napětí přesáhne mez kluzu, dochází ve svařenci k deformacím, které nepříznivě ovlivňují navržené rozměry a tolerance. Vnitřní napětí také souvisí se vznikem trhlin a vad. Nelze zcela odstranit vznik napětí a tedy deformace, lze je ovšem vhodným opatřením (konstrukčním, či technologickým) minimalizovat. [2] Obecně lze celkové prodloužení a smrštění vypočítat z následujícího vztahu.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T [mm] \quad (5.5.2)$$

kde:

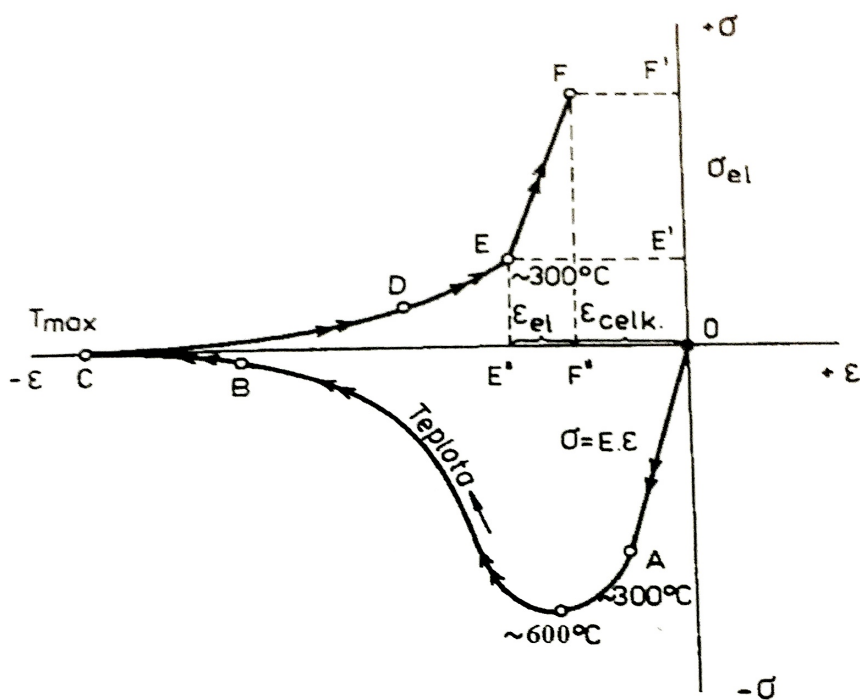
Δl : poměrné proudloužení (smrštění) [mm]

α : součinitel tepelné roztažnosti [mm/(m.°C)]

l : původní délka [mm]

ΔT : změna teploty [°C]

Obr. 9 zobrazuje idealizovaný průběh napětí (σ) a deformace (ϵ) při výrobě tupého svarového spoje. Při ohřevu vzniká ve spoji tlakové napětí, kvůli teplotní roztažnosti oceli. Zhruba do teploty 300 °C se u nelegovaných ocelí uplatňuje Hookův zákon. Závislost napětí a deformace je lineární (část O-A). S dalším ohříváním se mez kluzu oceli snižuje, nad teplotou 600 °C už má nízkou hodnotu. Výrazně se projeví deformace. Největší tlaková deformace je dosažena při nejvyšší teplotě (T_{max}). Tuto část zobrazuje křivka O-C. Při ochlazování dochází ke změně napětí na tahové (důsledek smršťování). Při teplotách nad 600° C vyvolá tahové napětí relativně velkou tahovou deformaci (úsek CD). Ochlazení v průběhu teplot 600-300 °C je závislost napětí a deformace opět lineární (přímka EF). Bod F je zároveň konečným bodem deformačního cyklu. Hodnota vzdálenosti mezi F'-O charakterizuje zbytkové napětí. Hodnota úsečky F''-O určuje zbytkovou deformaci. [25]



Obr. 9. Idealizovaná závislost napětí (σ) a deformace (ϵ) [25]

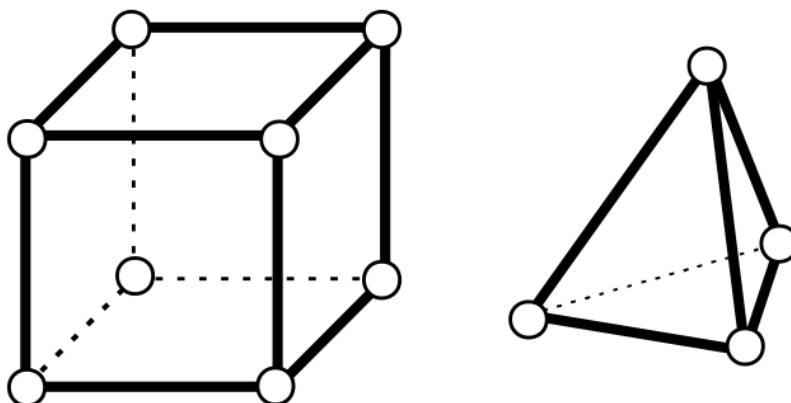
5. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Drtivá většina výpočetních programů je založena na metodě konečných prvků (MKP), anglicky finite element method – FEM. Jedná se o univerzální metodu popsání modelu. Je vhodná pro výpočet deformací a rozložení napětíového pole pro složité modelové součásti.

V praxi se vyskytuje více programů, jak vytvořit síť konečných prvků popisujících zkoumanou součást. Mohou být součástí CAD či jako samostatný program. K přenosu dat z CAD modelu slouží zejména univerzální formát dat – STEP.

Princip řešení MKP můžeme zjednodušeně popsat následovně. Zkoumaný dílec, jehož deformace nejsme schopni vypočítat, rozdělíme na velmi malé prvky. U těchto malých prvků se využívá zjednodušení, které je možné aplikovat pouze na velmi malé entity. Řešení v těchto částech je spojeno, neboť se vychází z předpokladu, že těleso zůstane v celku - nevytvoří se v něm dutiny.

Pro simulace 3D modelu svařence používáme objemové prvky (solidy). Mezi tyto prvky patří objekty ve tvaru kvádru či čtyřstěnu, Obr. 10. [10]



Obr. 10. Kvádr (vlevo) a čtyřstěn (vprav) [10]

Nutná podmínka při dělení modelu na částice je, že těleso musí zůstat i po rozdělení spojitě a geometrické prvky se nesmí vzájemně překrývat (penetrovat). Důvodem pro dělení na kvádry a čtyřstěny je zajištění jednoduchého matematického popisu (polynomy nízkých stupňů vytvořených prvků).

Při síťování (meshování) součásti je snaha o vytvoření co nejmenších prvků. Na druhou stranu vyšší počet prvků zahrnuje delší výpočetní čas. Ke každému uzlovému bodu jsou přiřazeny materiálové a mechanické vlastnosti tak, aby odpovídaly skutečnému dílci. Pro každý takto vzniklý uzel je přiřazen výpočet různých hodnot, např. napětí a deformace.

Z předešlých výzkumů vyplývá, že běžný výpočet numerické simulace svařovacího procesu transientní metodou, jejíž model obsahuje 300 000 uzlových bodů obsahuje okolo 8 GB dat.

Cílem této práce není detailní popsaní matematických procesů stojících za metodou konečných prvků. Pro běžného uživatele pracující se simulacemi nejsou stěžejní.

Pro práci při síťování se doporučuje několik obecných rad.

- V oblasti svarů je doporučeno zředit prvky – z důvodu zachycení účinku vneseného tepla.
- V oblasti mimo svařovací oblast naopak prvky zvětšit.

Během prací se simulačními softwary bylo zjištěno, že výpočetní čas roste kvadraticky s rostoucím množstvím prvků. Pro urychlení řešení MKP se využívají multiprocessorové řešiče, viz Tab. 1.

[4,5,10,11,12]

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Účelem experimentu bylo zjistit vhodnost konkrétního softwaru numerické simulace svařování pro potřeby firmy Doosan Bobcat EMEA, s.r.o. v Dobříši. Na trhu působí hned několik společností zabývajících se numerickými simulacemi. Mezi největší řadíme francouzskou skupinu ESI GROUP a jejich program SYSWELD, či německou skupinu MSC.Software s programem Simufact.welding. Volba testování padla právě na produkty společnosti MSC.Software.

Skupina Simufact, jež patří do MSC nabízí produkty Simufact.forming a Simufact.welding. Tyto dva kompaktní produkty velmi dobře zahrnují skutečný technologický proces výroby. V případě automobilového průmyslu: tváření dílce (plechu) → svaření součástí dohromady. Domnívám se, že propojením programů získáváme unikátní analýzy vneseného vnitřního napětí od tváření, které se odrazí na výsledném pnutí ve svařenci.

Pole působnosti:

- Tepelné spojování (svařování, pájení),
- tváření a ohýbání (za tepla i studena),
- tepelné zpracování.

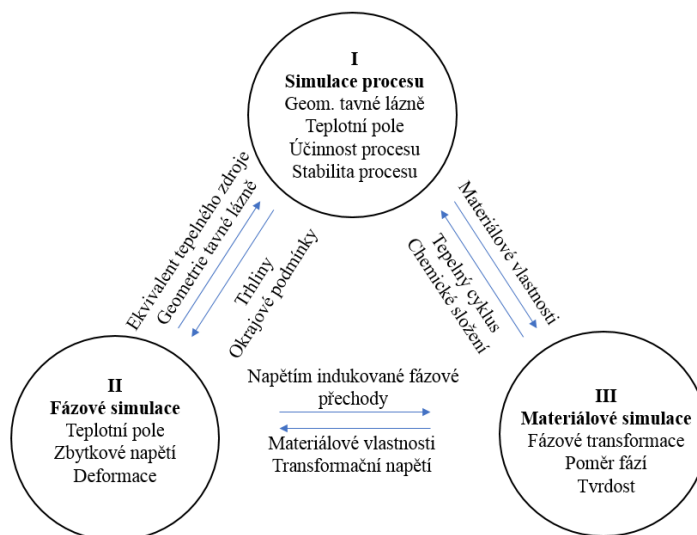
Pro potřeby importu dat se používá nativní program APEX, jenž umožňuje síťování CAD modelu. Práce probíhala tedy v programech APEX, v němž se vytvořil model se strukturou MKP a Simufact welding, který zahrnuje řešení numerické simulace.

Princip simulace je zřejmý z obrázku Obr. 11.

Oblast

- I. Simulace procesu – zajištěna řešičem Mark, který vrací vazbu na oblast II (tepelný zdroj, tavná lázeň) a III (tepelný cykly, chemické složení). Zahrnuje tavnou lázeň, teplotní pole, výkonnost a stabilitu procesu.
- II. Simulace struktury (modelu) – teplotní pole, zbytkové napětí a deformace. Předává informace o trhlinách a okrajových podmínkách (např.: upínací systém). Pro III udává informace o napět'ově aktivované fázové transformaci.
- III. Simulace materiálu – fázové transformace, poměr fází, tvrdost. Podává informace o materiálových vlastnostech. K II. o materiálových vlastnostech a transformačním napětí.

Mark je výkonný řešič pro nelineární analýzy popsané MKP, který přesně simuluje chování produktu během statického, dynamického zatížení. Je součástí programu Simufact.welding. [13]



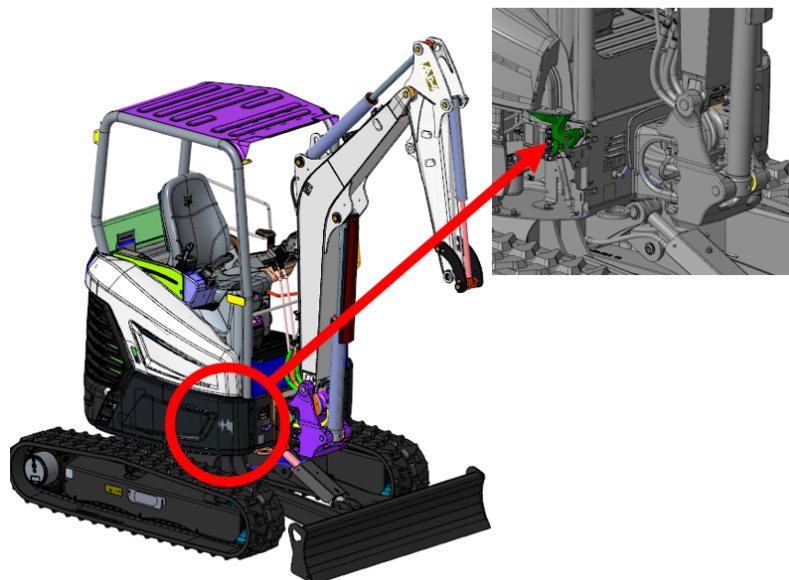
Obr. 11. Struktura simulace svařování[13]

6.1. PLÁN EXPERIMENTU

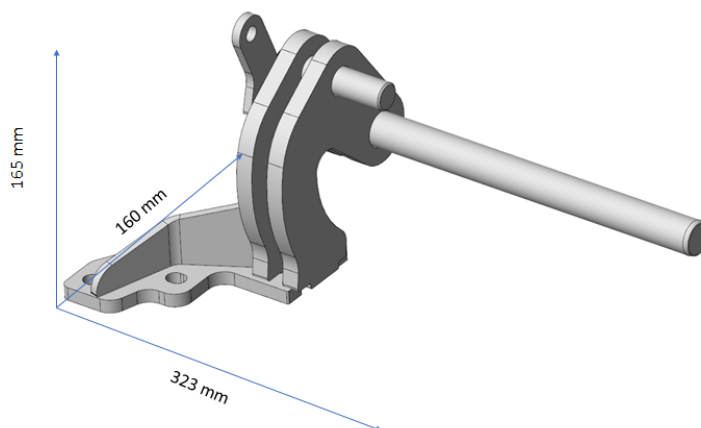
1. Určení experimentálního dílce
2. Zjištění vstupních dat pro potřeby numerické simulace
 - a. Určení svařovacího přípravku
 - b. Určení velikosti svarů a jejich sekvence
 - c. Určení okrajových podmínek (stehy)
3. Sítování modelu
4. Určení materiálových dat
5. Definování tepelného zdroje
 - a. Rychlost svařování
 - b. Proud, napětí, účinnost
 - c. Rozměry tepelného zdroje
6. Spuštění simulace v několika variantách (z důvodu optimalizace simulace)
7. Měření svařených kusů s dodrženým postupem výroby
8. Vyhodnocení shody simulace s naměřenými hodnotami

6.2. URČENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO DÍLCE

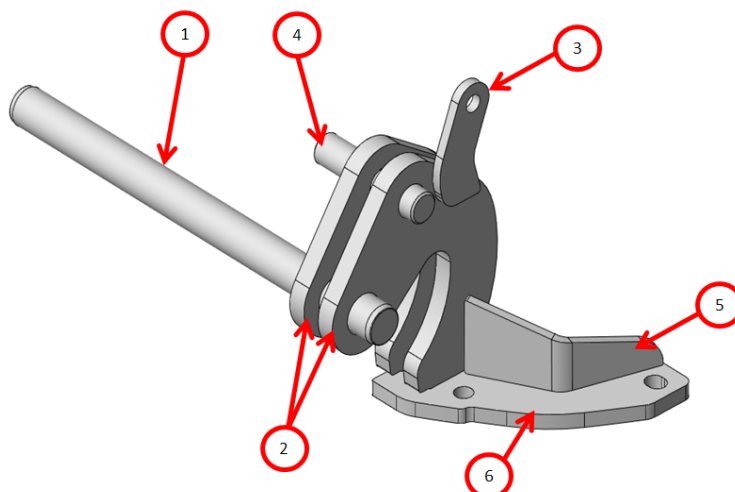
Pro potřeby experimentu byl zvolen dílec Hinge RH K2 cover. Původní záměr padl na simulaci celé radlice na tomto stroji, důvody změny jsou vysvětleny v kapitole 9. Tento dílec je součástí nové generace bagrů, který se bude vyrábět tento rok. Díl slouží jako držák pravého krytu, přes který se také kryt otevírá. V dnešní době se na výrobu bagrů hledí podobnou optikou jako na výrobu aut. Nejde jen o funkčnost a životnost stroje, ale také o design. Právě marketing klade, čím dál větší důraz na konečný vzhled stroje, v tomto případě lícování krytů, tak aby mezery mezi jednotlivými kryty a ostatními pohledovými prvky stroje byly stejné. Z tohoto důvodu se jedná o vhodný svařenec, neboť je zde kladen důraz na přesnost dílce a čímž je nutné znát výsledné deformace pro optimální nastavení procesu a přípravku. Díl je umístěn v sérii rypadla označené E26 a E27. Obr. 12 zobrazuje model rypadla E27 a detailní pohled umístění zkoumaného dílce.



Obr. 12. Umístění experimentální dílce v rámci stavebního stroje



Obr. 13. Experimentální dílec K2 RH Hinge – rozměry



Obr. 14. Experimentální dílec K2 RH Hinge - pozice

Svařovaná sestava se skládá celkem ze 7 komponentů. V Tab. 2 je zobrazen kusovník.

POZICE	NÁZEV	POČET	MATERIAL
1	PIN HINGE	1	ASTM A576 - 1018HR
2	PLATE HINGE	2	S235J2+N
3	PLATE SPRINGE GAS	1	S235J2+N
4	STOP RH COVER	1	ASTM A576 - 1018HR
5	PLATE HINGE SUPPORT	1	S235J2+N
6	PLATE HINGE 2	1	S235J2+N

Tab. 2. Kusovník

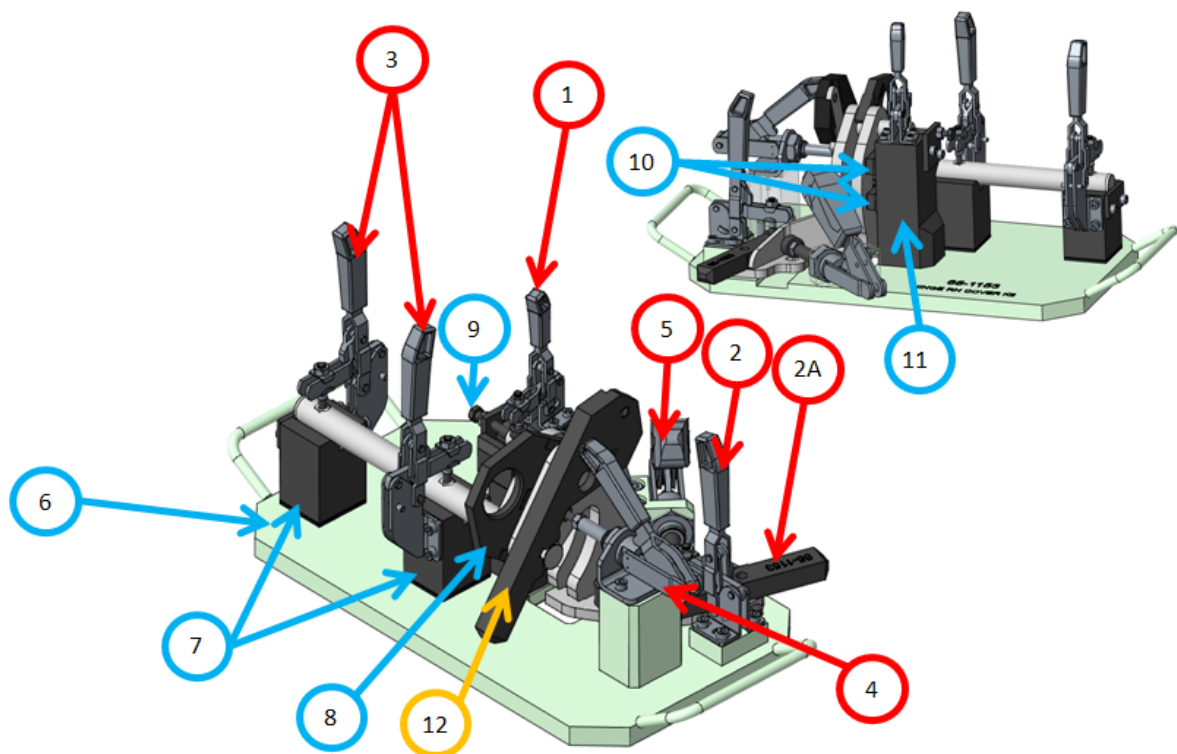
6.3. URČENÍ SVAŘOVACÍHO PŘÍPRAVKU – OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Dílec je svařován ve svařovacím přípravku s číslem označení 65-1153, viz Obr. 15.



Obr. 15. Svařovací přípravek

Pro potřeby simulace není potřeba všech jeho komponentů. Model přípravku je zřejmý z Obr. 16.



Obr. 16. Model přípravku se založeným kusem

Seznam použitých upínacích prvků je vyobrazen v Tab. 3.

	UPÍNACÍ PRVEK	FUNKCE	SÍLA	
1	UPÍNAČ SVISLÝ AMF 90019 KAT	CLAMPING	600	N
2	UPÍNAČ SVISLÝ AMF 90027 KAT	CLAMPING	800	N
3	UPINAC SVISLÝ AMF90324	CLAMPING	1000	N
4	OJNICOVÝ UPÍNAČ AMF 94128	CLAMPING	2000	N
5	OJNICOVÝ UPÍNAČ AMF 93930	CLAMPING	2500	N
6	DESKA	BEARING		
7	PODPERA	BEARING		
8	ROZPĚRA	BEARING/CLAMPING		
9	DORAZOVÝ ŠROUB	BEARING		
10	DORAZ	BEARING		
11	PODPERA 2	BEARING		
12	ŠABLONA	STEH. PŘÍP		

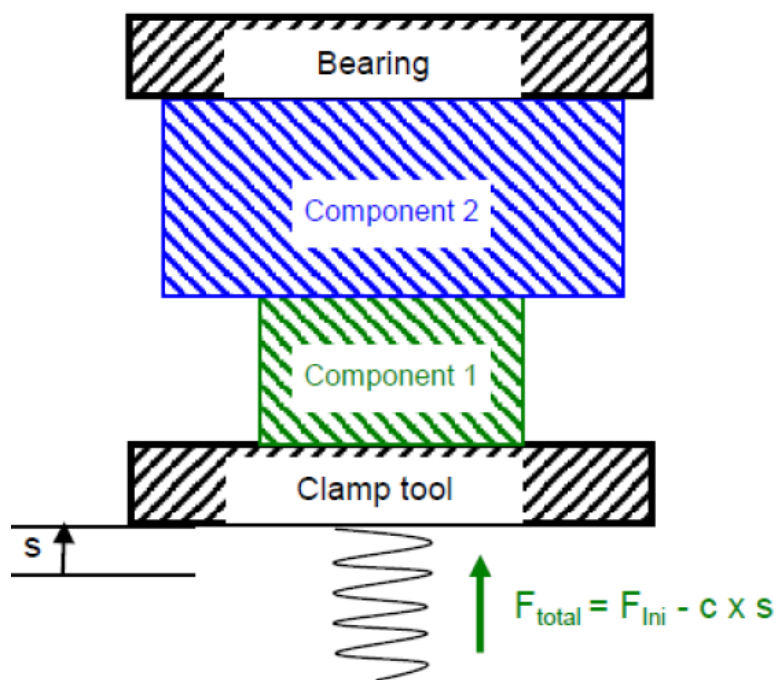
Tab. 3. Kusovník svařovacího přípravku včetně působících sil [na základě dat od dodavatele upínek AMF]

Clamping

Červeně označené upínací prvky značí z Obr. 16, že působí na svařenec silou. Síla jednotlivých upínek je odlišná hlavně díky nastavení a mohutnosti. Ta je určena z katalogu a konzultace s dodavatelem AMF.

V simulačním programu Simufact.welding je daným upínkám přiřazena funkce tzv. clamping. Upínka typu clamping pracuje jako pružina, které může působit silou směrem k normále kontaktního povrchu. Díky působení síly dochází k přesnému uložení svařovaných

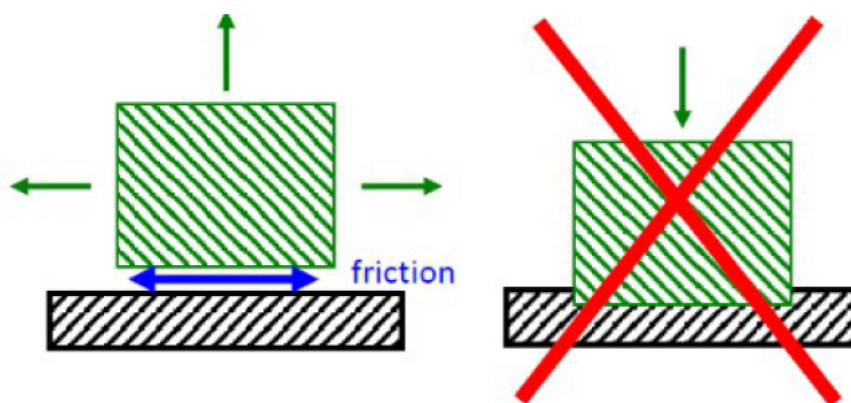
dílčů v přípravku. Je možnost nastavit její deaktivaci v určitém čase. Obr. 17 demonstruje funkci clamping. [13]



Obr. 17. Princip funkce clamping [13]

Bearing

Modře označené prvky z Obr. 16 signalizují dorazy. V programu Simufact.welding jsou tyto upínací prvky charakterizovány jako „bearing“. Ty zabraňují pohybu svařence (kontaktních uzlů) v pohybu směrem do bearingu. Neomezuje pohyb do ostatních směrů, nicméně pohyb je zpomalován třecí silou. Pro přehled slouží Obr. 18. [14]



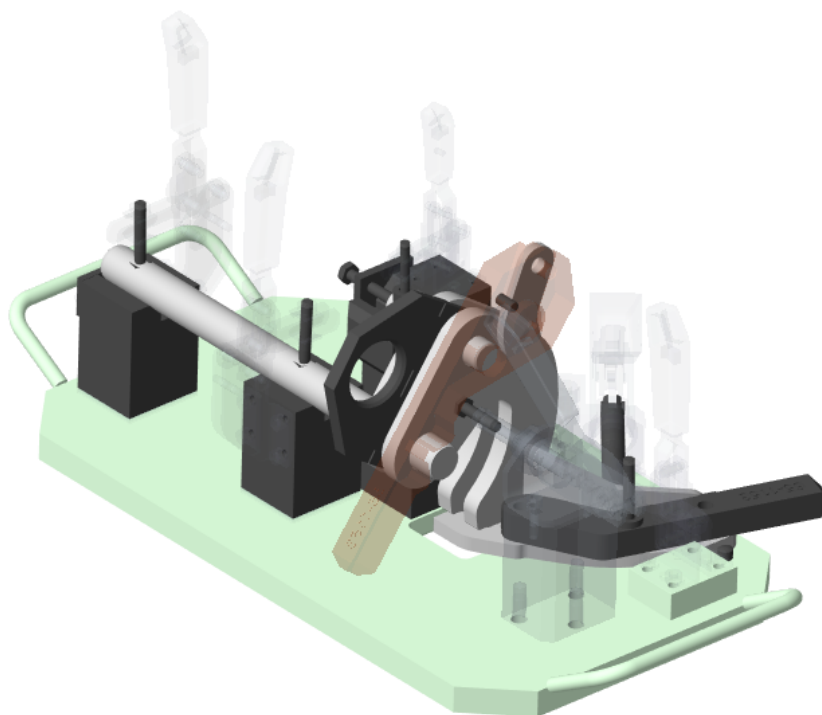
Obr. 18. Princip funkce bearing [14]

Pro účely výzkumu je provedena simulace, kdy funkci upínky č. 8 nahradíme z původního bearingu na clamping. Ta nebude působit žádnou silou, pouze svou tuhostí, aby nedocházelo k nereálným silovým působením. Důvodem jsou vlastnosti této části upínky. Upínka (rozpěra), jako taková, není pevně spoje s přípravkem, je pouze vložena jako distanční

těleso mezi dva svařované kusy. Pro tyto účely by mělo být vhodnější použít právě funkci clamping.

Oranžově označený prvek 12 (šablona) z Obr. 16 slouží jako stehovací přípravek pro přesné uložení dílu ve svařovacím celku. Tato šablona není potřeba pro výpočet simulace.

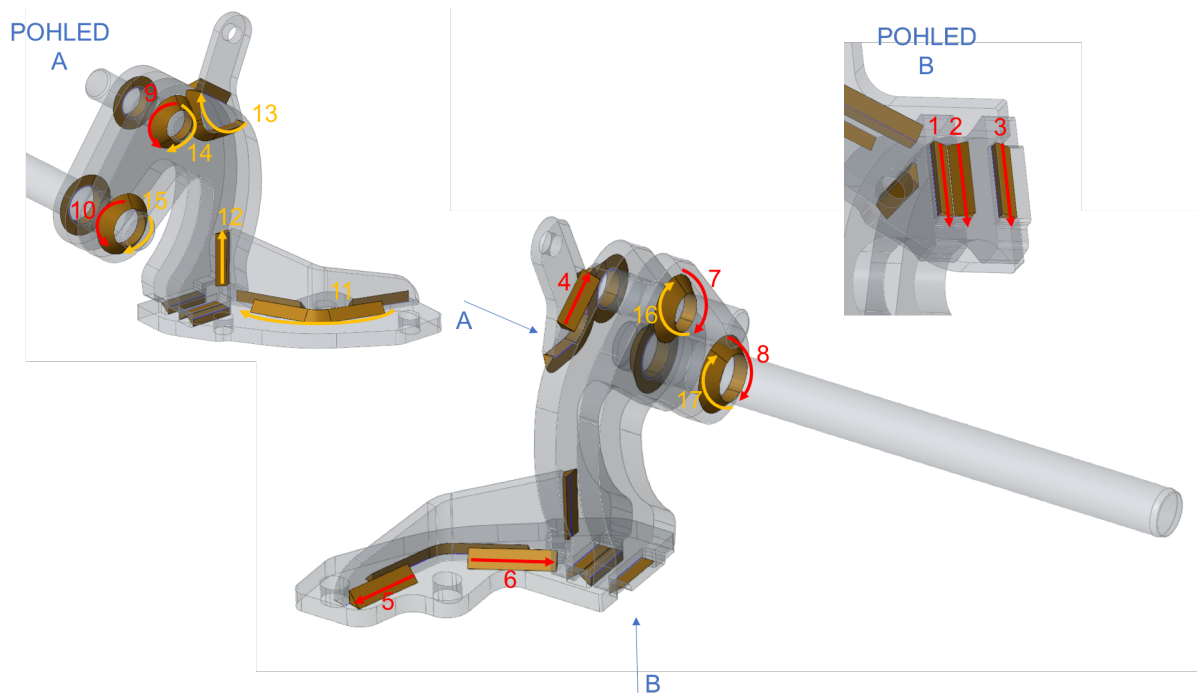
Pro potřeby simulace došlo k odstranění nepotřebných částí. Pro síťování zůstanou pouze díly, jenž se přímo dotýkají součásti a působí na díl během procesu svařování. Odstraněny budou i ty části přípravku sloužící pro stehování svařence, viz. Obr. 19.



Obr. 19. Připravený model přípravku pro síťování

6.4. MODELOVÁNÍ SVARŮ

Umístění svarů je řízeno výkresovou dokumentací. Pro přesnost vstupních dat byly překontrolovány skutečné velikosti svarů, pomocí měřky. Na Obr. 20 vidíme zobrazení všech svarů a příslušných směrů svařování. Měření bylo provedeno za účasti specialisty na měření svarů a svařenců v podniku na třech vyhotovených dílech. Měření bylo vyhodnocováno dle norem, které se v podniku využívají, tedy ANSI (americké) → hodnota svaru = z. Velikost svaru je určena jako průměrná hodnota ze třech měřených svařenců pro každý svar. Hodnota byla brána z důvodu značného rozptylu měřených hodnot, jenž způsobuje ruční svařování metodou MAG. Jednotlivé velikosti naměřených svarů jsou zobrazeny v Tab. 4.



Obr. 20. Sekvence svarů

Č. SVARU	TYP	SKUTEČNÁ VELIKOST [z]	SVAŘOVÁNÍ
1	KOUTOVÝ	5	V PŘÍPRAVKU
2	KOUTOVÝ	5	
3	KOUTOVÝ	6	
4	KOUTOVÝ	5	
5	KOUTOVÝ	5	
6	KOUTOVÝ	5	
7	KOUTOVÝ	7	
8	KOUTOVÝ	7	
9	KOUTOVÝ	7	
10	KOUTOVÝ	7	
11	KOUTOVÝ	5	BEZ PŘÍPRAVKU
12	KOUTOVÝ	4	
13	KOUTOVÝ	5	
14	KOUTOVÝ	7	
15	KOUTOVÝ	7	
16	KOUTOVÝ	7	
17	KOUTOVÝ	7	

Tab. 4. Výsledek měření velikosti jednotlivých svarů

6.5. POPIS SVAŘOVACÍHO PROCESU

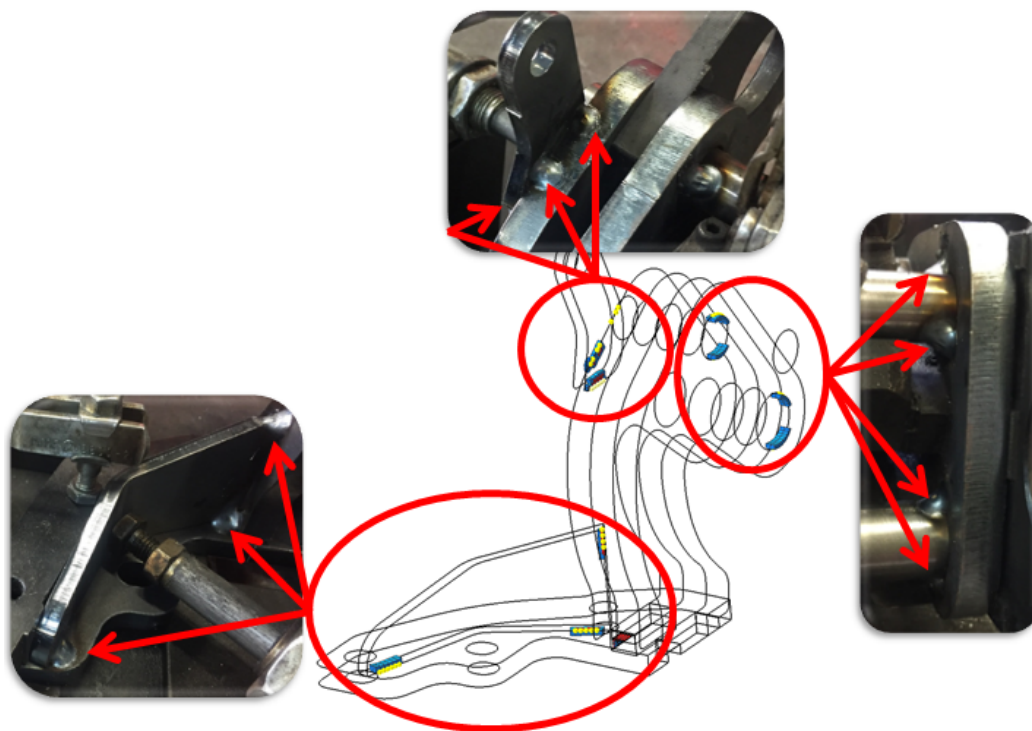
Tato kapitola se zabývá popsáním svařovacího procesu. Proces přípravy na svařování má několik fází.

1. Ustavení dílů do přípravku – v návodce je popsán přesný postup, jak složit svařenec a upnout jej do přípravku. Tato fáze zde není řešena.
2. Stehování – založený dílec svařeč dle návodky spojí bodovými svary (nastehuje). Pro tuto operaci je používán přípravek s označením čísla 12 z Obr. 16. Po nastehování svařeč šablonu vyjme z přípravku a dál se s ní nepracuje. V této fázi musíme definovat lokální místa stehování. Pro tuto operaci v programu Simufact.welding použijeme funkci local joint. Viz kapitola 6.6.
3. Po nastehování svařence svařeč svařuje v předepsané sekvenci dle Obr. 20. Parametry svařovacího procesu jsou zobrazeny v Tab. 10.
4. Po svaření prvních 10 svarů svařeč vyjme svařenec z přípravku. Svary, které se svařují v přípravku jsou označeny na Obr. 20. červeně a šipka definuje směr svařování.
5. Svařeč svaří zbývající svary, ty jsou na Obr. 20 označeny oranžově.

6.6. STEHOVÁNÍ SVAŘENCE

Po ustanovení všech dílců v přípravku dochází nejprve k tzv. stehování. Pro tento proces je v programu Simufact.welding vyhrazena speciální funkce, local joint. Ta se využívá k „přilepení“ dvou komponentů k sobě. Chápejme jej jako „lepený svar“.

Funkci můžeme využít k přichycení dvou komponentů k sobě mezi nimiž je malá mezera. Ta je v místě local jointu uzavřena a je vytvořena beznapět'ová deformace. Pozice stehů je zřejmá z Obr. 21. Elementy zobrazené v drátovém modelu signalizují beznapět'ové spojení (deformaci). [15]

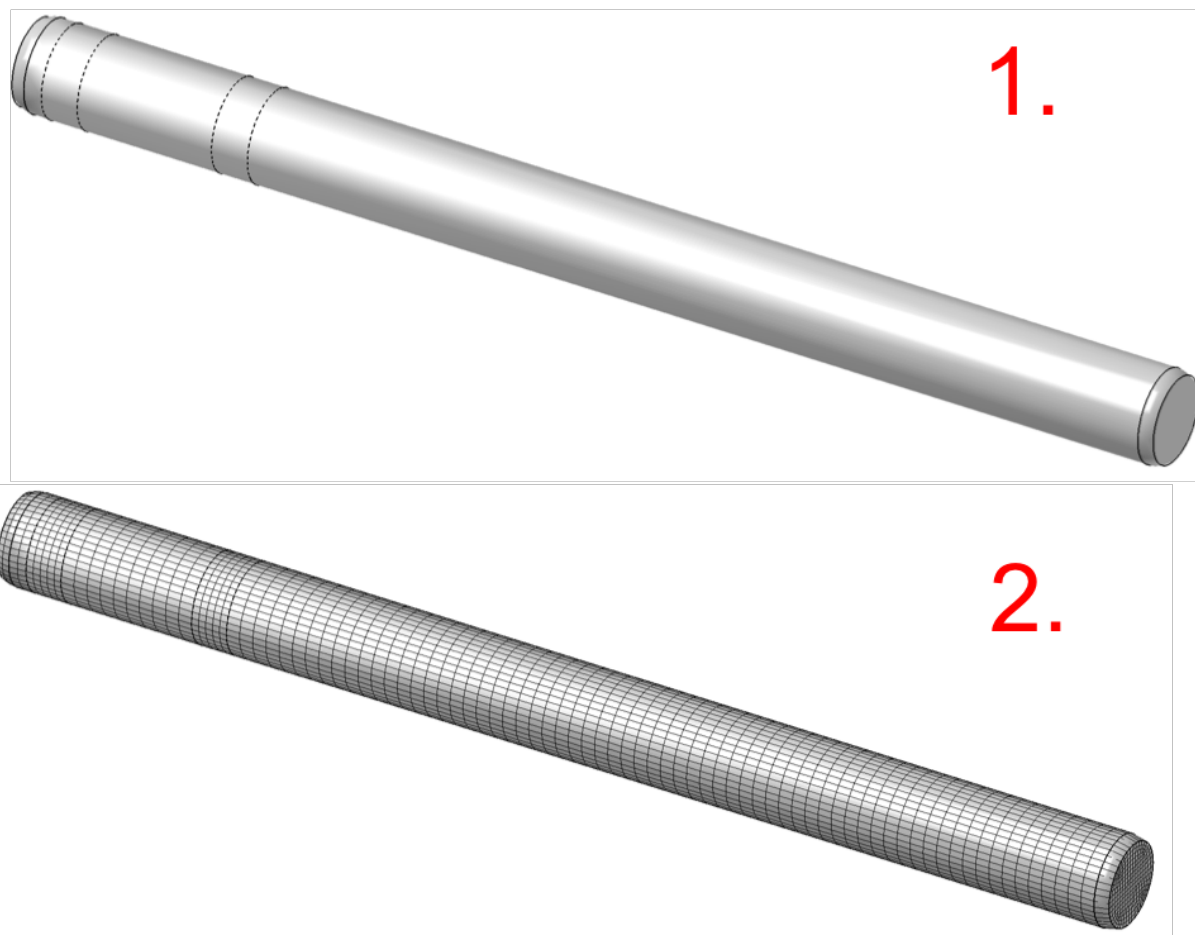


Obr. 21. Pozice stehů

6.7. SÍŤOVÁNÍ MODELU

Program Simufact.welding, ale i jiné programy umožňující simulaci technologických procesů většinou pracují s metodou konečných prvků. Import zkoumaných dílců probíhá jako vložení jejich 3D sítě ve formátu .bdf. Síťování probíhalo v programu Apex, jenž spadá pod společnost MSC Software. Způsob síťování byl konzultován se zástupci společnosti MSC.Software a byl brán zřetel na jejich doporučení. Síťování bylo zjemněno v místech svarů na velikost elementů 1,5 mm, pro správné zachycení tepelného účinku. Prvky, které nezasahují do oblasti svaru, byly zvětšeny na velikost hrany prvku 3 mm, z důvodu snížení celkového počtu počítaných bodů. Velikost prvků je pevně svázána s celkovým počtem počítaných uzlů a musí se volit vhodný poměr mezi počtem prvků a délkou výpočtového času. Síťování proběhlo formou kvádrových prvků, ty mají oproti čtyřstěným zaručit přesnější kvalitu výpočtu.

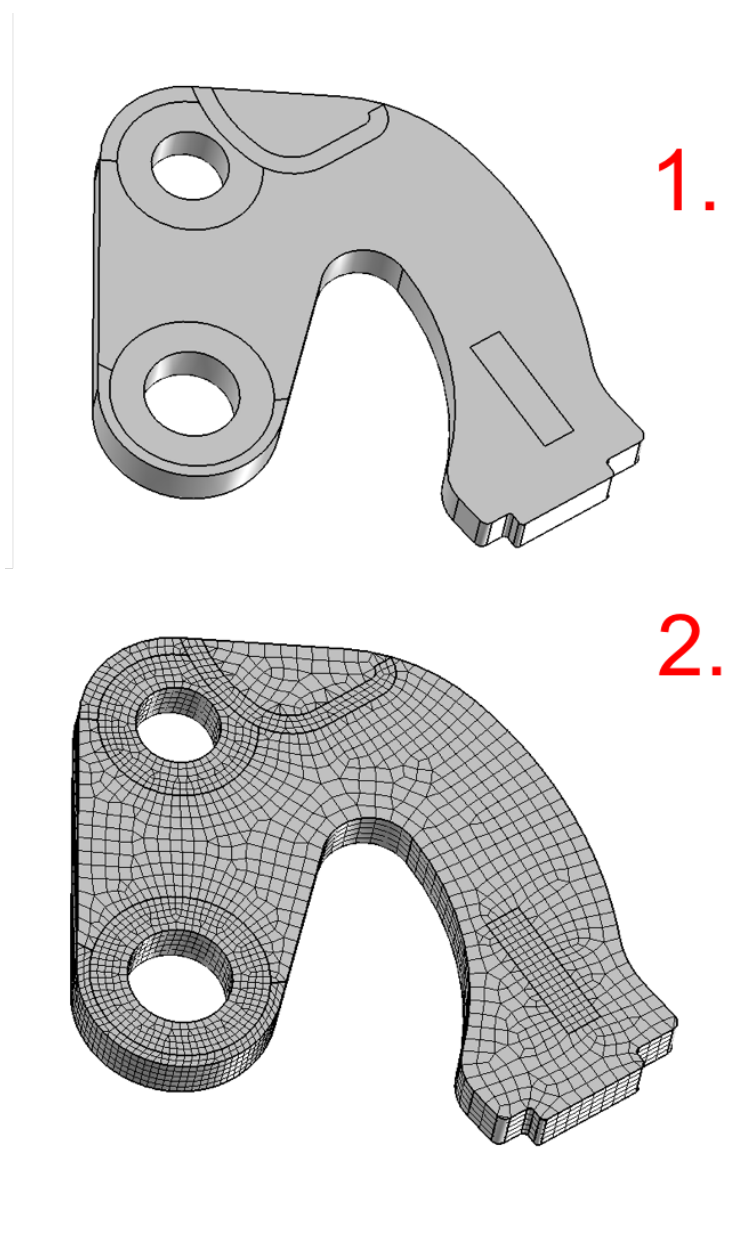
Pin hinge



Obr. 22. Síť dílu Pin hinge

Prvek označen číslicí 1. značí CAD model svařovaného dílce. Na Obr. 22 jsou vidět i oblasti, které budou následně vysítovány menšími prvky (oblast svaru). Na prvku s číslem 2 je již hotová síť určená k exportu do programu Simufact.welding.

Plate Hinge

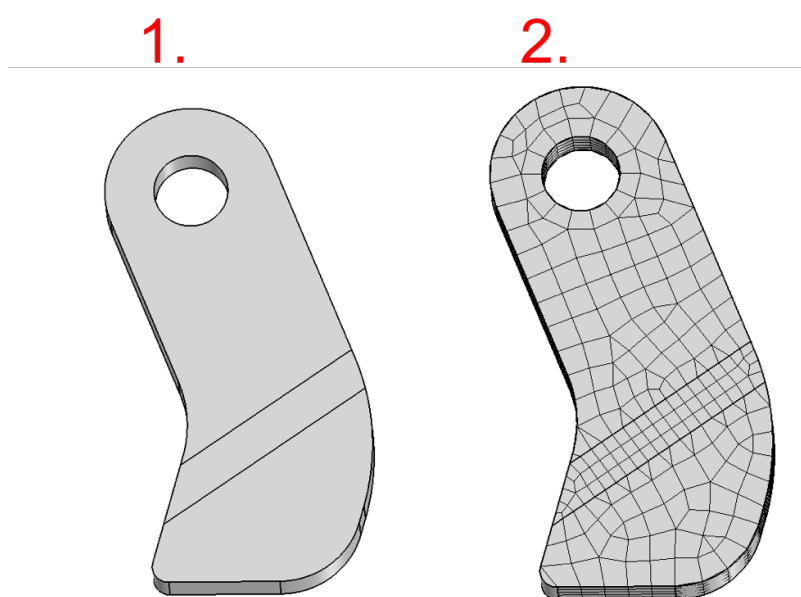


Obr. 23. Síť dílu Plate hinge

Obdobný příklad, nejdříve je označena oblasti v místě budoucího svaru a následně zjemněny prvky. V tomto případě je 5 prvků na tloušťku páleného materiálu. Ta činí 10 mm.

V procesu svařování je tento dílec použit 2x. Síťování proběhlo na stejném principu. Oproti Obr. 23 má druhý díl zjemnění elementů pouze kolem kruhových děr, neboť k jinému svařování u něho nedochází.

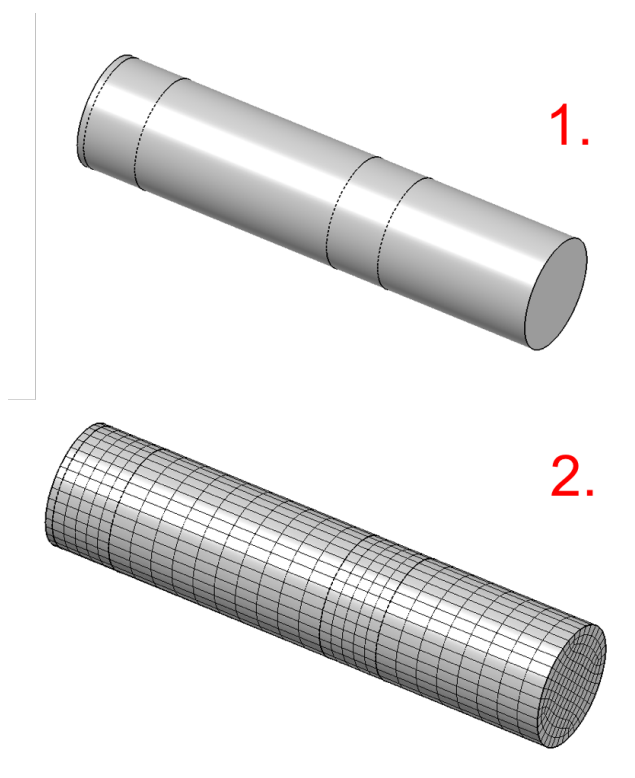
Plate spring gas



Obr. 24. Síť dílu Plate spring gas

Stejný princip síťování. Označení oblasti svarových ploch a jejich zjemnění. Jedná se o plech menší tloušťky než Plate spring gas, přesto je na tloušťku materiálu 5 prvků. Tloušťka páleného dílce činí 5 mm.

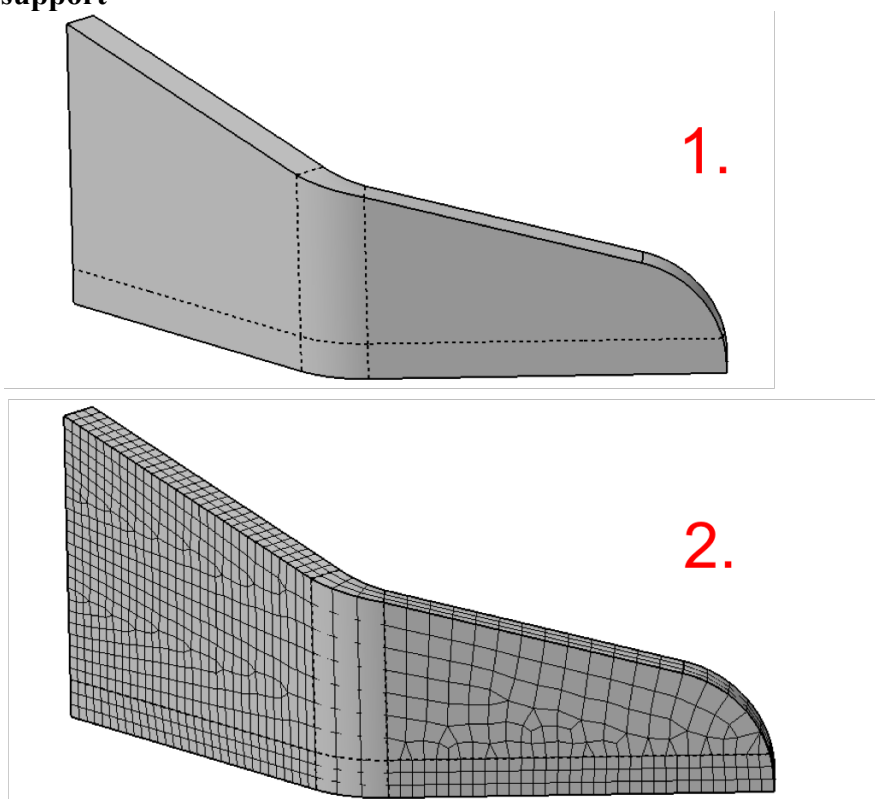
Stop RH cover



Obr. 25. Síť dílu Stop RH cover

Logika přístupu je stejná jako pro první síťovaný dílec. S výjimkou, že se jedná o tyč s menším průměrem. Oblast zjemnění signalizují přerušované kružnice na prvku 1.

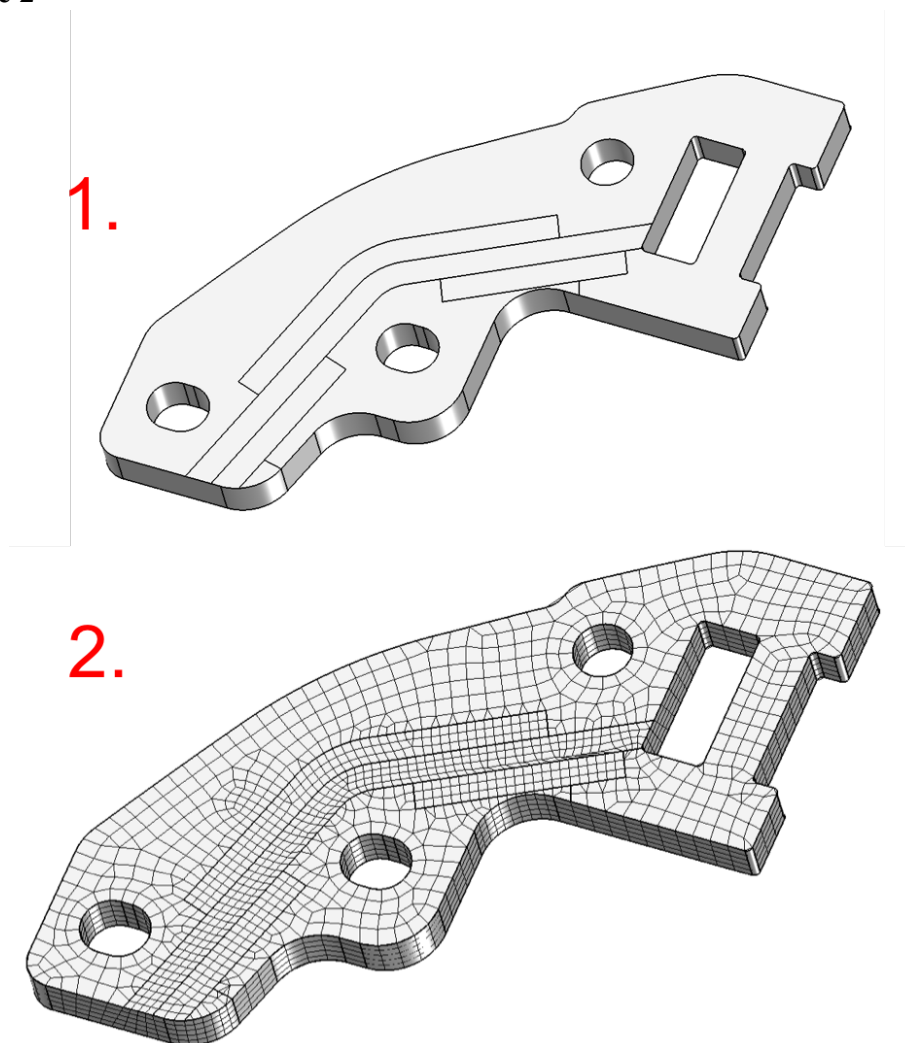
Plate hinge support



Obr. 26. Síť dílu Plate hinge support

Tloušťka páleného plechu je 5 mm, tudíž jako v předchozím případě jsou 3 prvky na sílu materiálu. Jedná se o pálený a ohýbaný dílec.

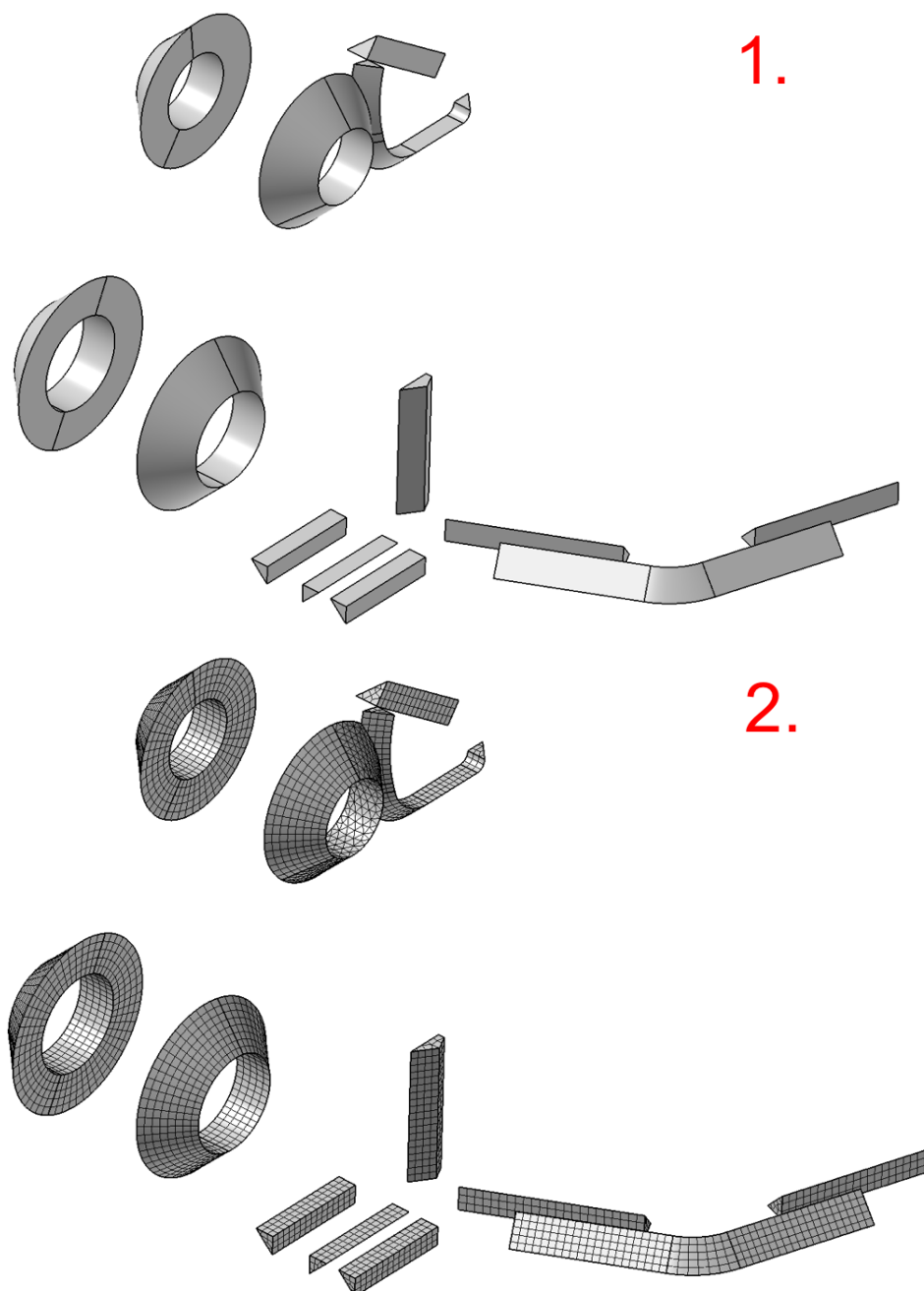
Plate hinge 2



Obr. 27. Síťování dílu Plate hinge 2

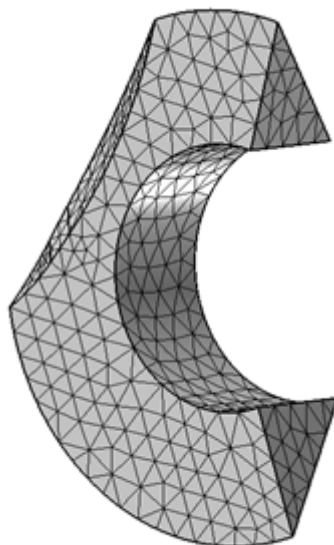
Přestože tloušťka plechu činí 8 mm, je i tak vytvořeno 5 prvků. Důvodem jsou první 4 svary, které se svařují na plochu, což je právě tloušťka páleného dílce. Ostatní svary, které jsou kladeny už na plochu dílce, zobrazují čáry na prvku číslo 1. Velikost prvků v oblasti svarů činí 1,5 mm a velikost prvků mimo svarové plochy 3 mm.

Svary



Obr. 28. Síť svarů

Tak jako u svařovaných dílců proběhlo síťování i u svarů prvky hexagonálními (kvádry). Výjimku tvoří svar s číslem 14. Čtrnáctý svar byl síťován pomocí tetragonálních (čtyřtěn) prvků, viz Obr. 29.



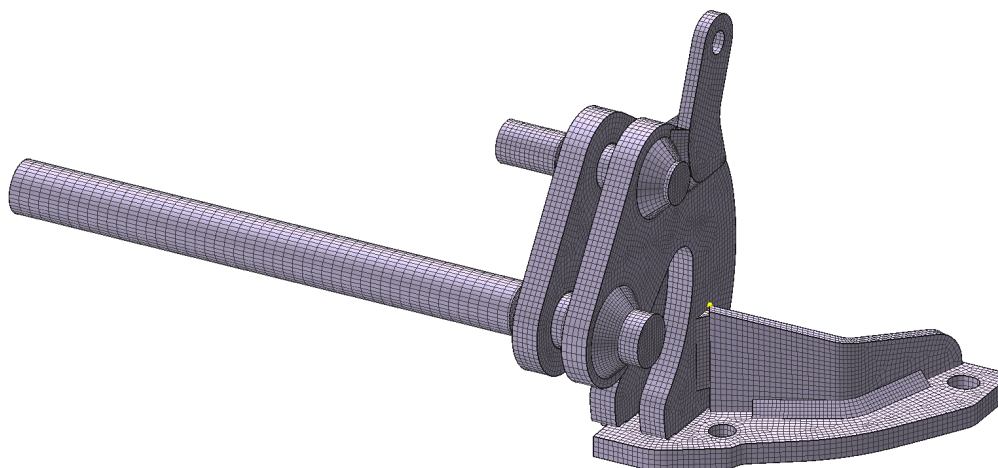
Obr. 29. Síť svaru číslo 14 s tetragonálními prvky

Důvod změny metody je, že se jednotlivé housenky svarů číslo 13 a 14 částečně protínají. Z tohoto důvodu byla oblast svarové housenky v místě protínání odstraněna. Odstraněním oblasti průniku se zabezpečil jeden z hlavních požadavků simulačního programu. To, že nesmí docházet k průniku sítí jednotlivých elementů.

Tento tvar housenky není možné síťovat hexagonálními prvky, a proto bylo přistoupeno k použití tetragonálních prvků. Tyto elementy jsou schopny vzniklý tvar bezpečně opsat. Jak již bylo zmíněno výše, tetragonální prvky způsobují nižší přesnost výpočtu oproti hexagonálním.

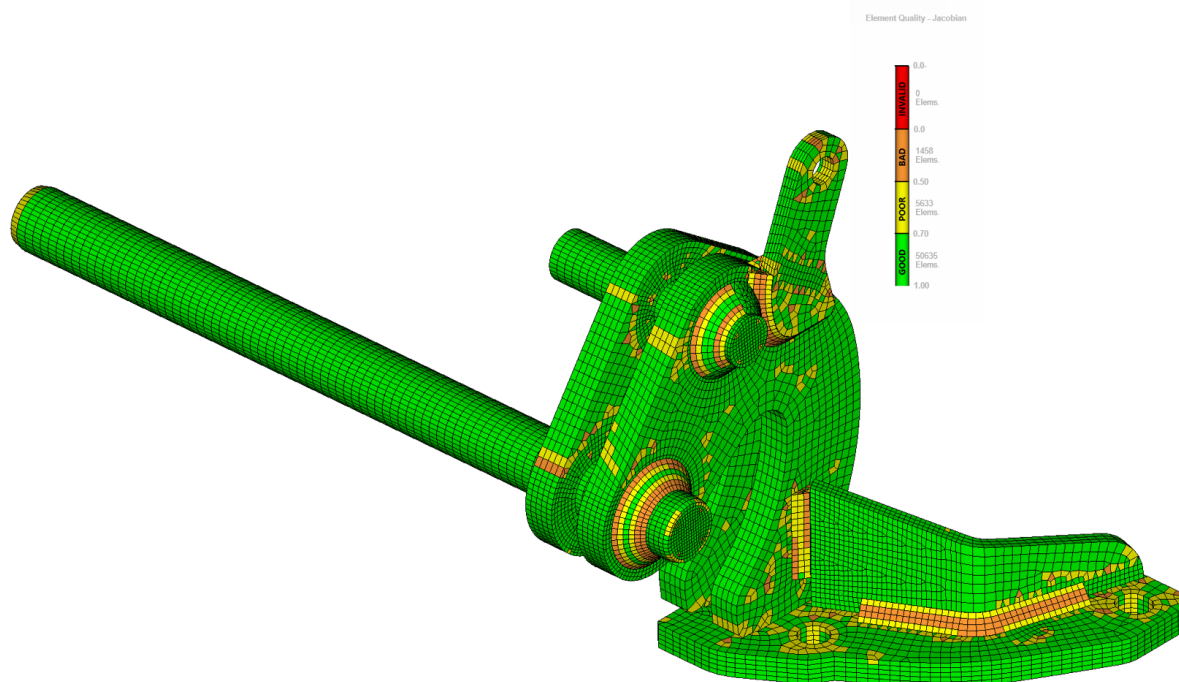
Sestava

Pohled na celkovou svařovací sestavu vidíme na Obr. 30. takto vzniklá sestava obsahuje 54 659 elementů, které metodou konečných prvků popisují svařovaný model. Pro potřeby výpočtu tato sestava obsahuje celkem 70 074 uzlů. V každém uzlu probíhá výpočet pro tepelně-metalurgickou a následně mechanickou analýzu.



Obr. 30. Síť sestavy

Pro ověření správnosti všech prvků slouží v programu Apex funkce „element quality“. V provedené analýze nesmí sestava obsahovat neplatný (invalidní) prvek. Tato podmínka byla dodržena, viz. Obr. 31.



Obr. 31. Element quality analýza

Okrajové podmínky

Okrajové podmínky (upínky a dorazy) není třeba v programu Apex speciálně síťovat. Tím, že se nejedná o zkoumaný dílec, a tudíž není zájem o napětí, či deformace přímo ve svařovacím přípravku, stačí mít na těchto prvcích pouze plošnou síť.

Plošnou síť pro svařovací přípravek je schopen vytvořit program Simufact.welding sám během importu CAD dat do Simufact.welding.

6.8. MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI PRO SIMULACE

Materiály jednotlivých komponentů jsou uvedeny v Tab. 2. Všechny díly, které se vyrábějí pálením z plechového polotovaru, jsou z materiálu S235J2+N. Tyče (pin hinge a stop RH cover) jsou nakupované a dodávané přímo bez jakýkoliv technologických zásahů přímo na svařovnu. Materiálem je dle americké normy ASTM – A576 – 1018HR, alternativou je pak dle evropských směrnic EN 10084 – C15, či C16.

6.8.1. Ocel S235J2+N

- S – ocel pro ocelové konstrukce
- 235 – Re 235 MPa (mez kluzu)
- J2 – rázová práce min. 27J
- N – normalizačně žíhané nebo válcované

V následujícím textu jsou představena materiálové vlastnosti pro ocel S235 z materiálové banky programu Simufact.welding.

Chemické složení

Prvek	C	Cu	Fe	Mn	N	P	S
Množství [obj.%]	0.15	0.4	98.293	1.1	0.01	0.02	0.028

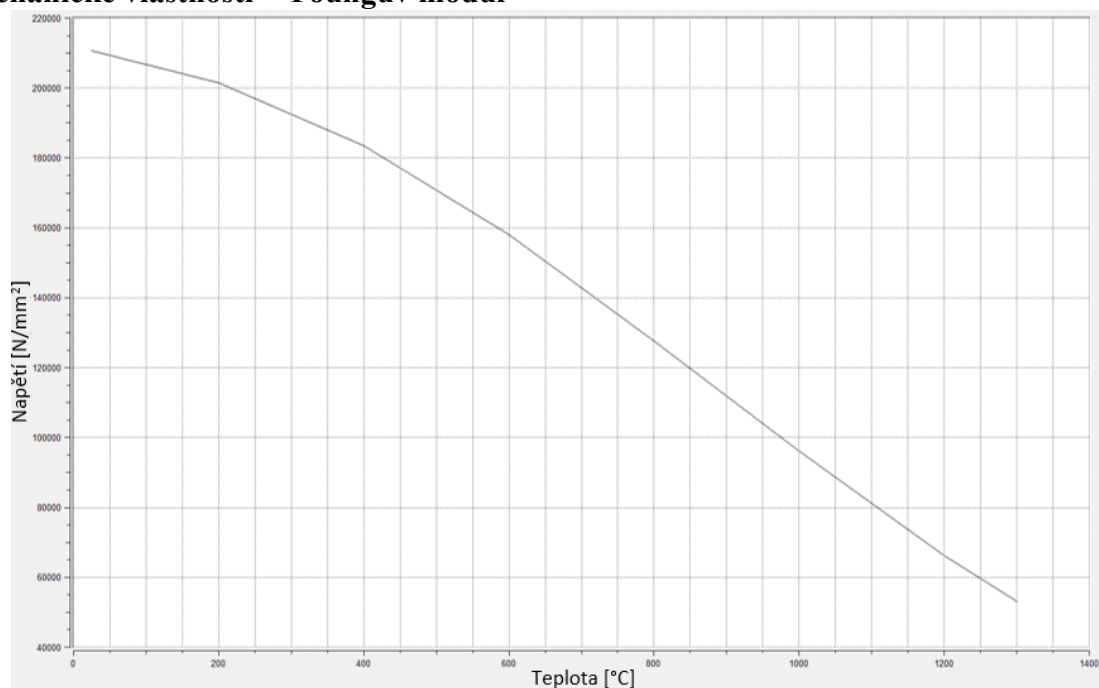
Tab. 5. Chemické složení oceli S235 [20]

Chemické složení uvedené v Tab. 5 je přesně použito při simulaci.

Vlastnosti materiálu

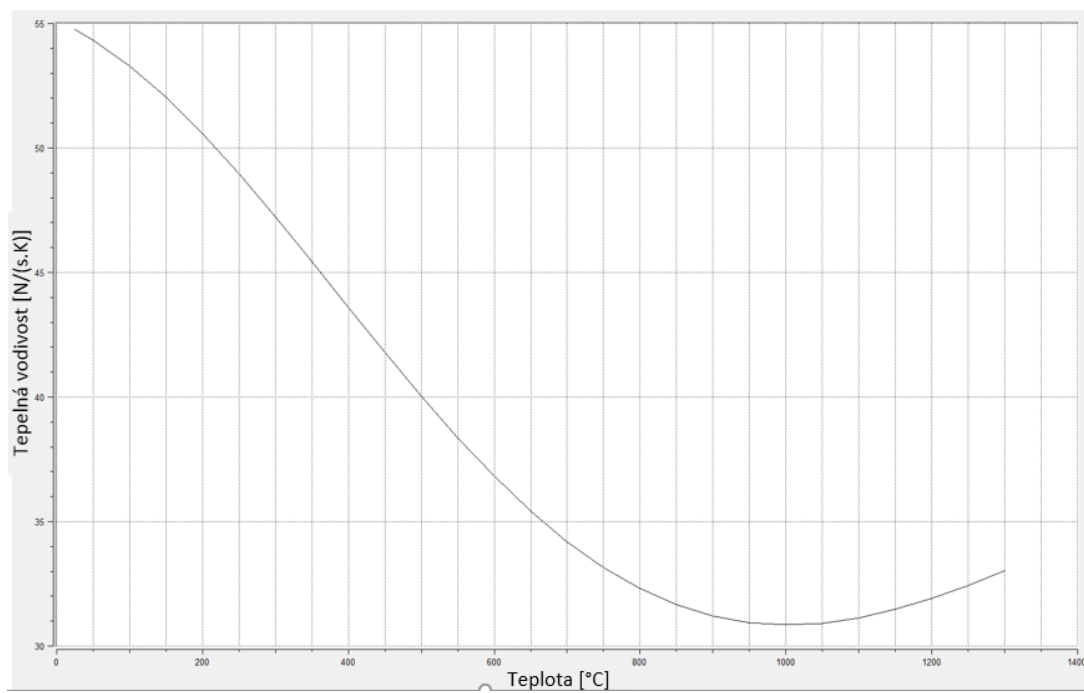
- Disipační faktor – 0,9 [-]
- Bod tavení – 1517,14 °C
- Bod tuhnutí – 1466,85 °C
- Latentní teplo – 256 KJ/kg

Mechanické vlastnosti – Youngův modul



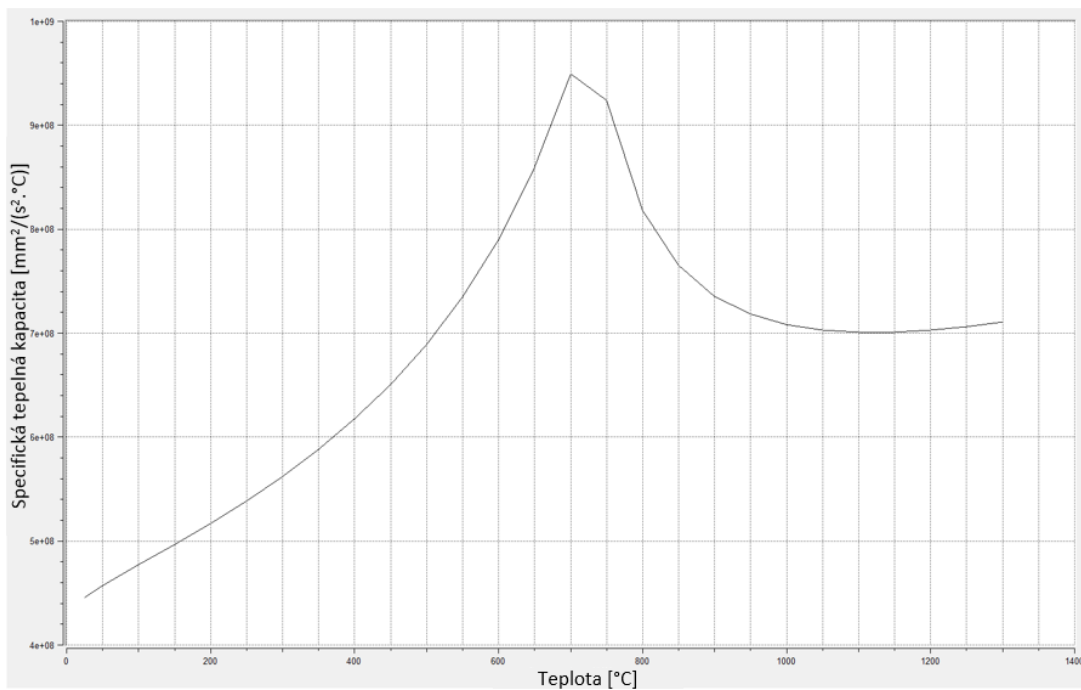
Graf 1. Závislost Youngova modulu na změně teploty pro ocel S235 [20]

Tepelné vlastnosti – tepelná vodivost



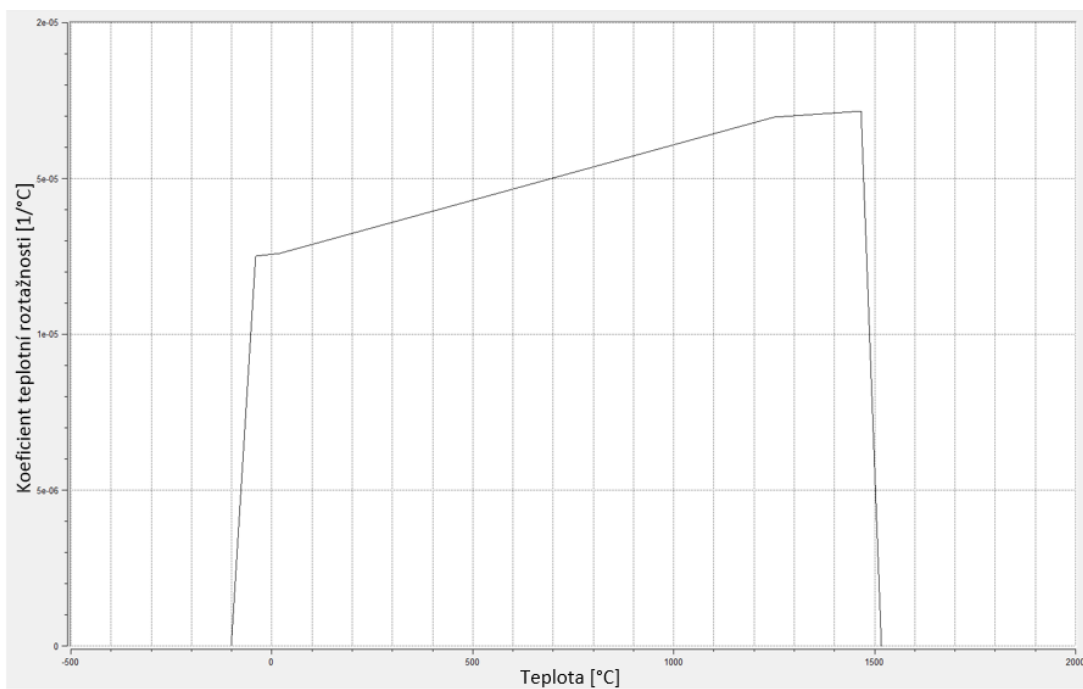
Graf 2. Závislost tepelné vodivosti na změně teploty pro ocel S235 [20]

Specifická tepelná kapacita



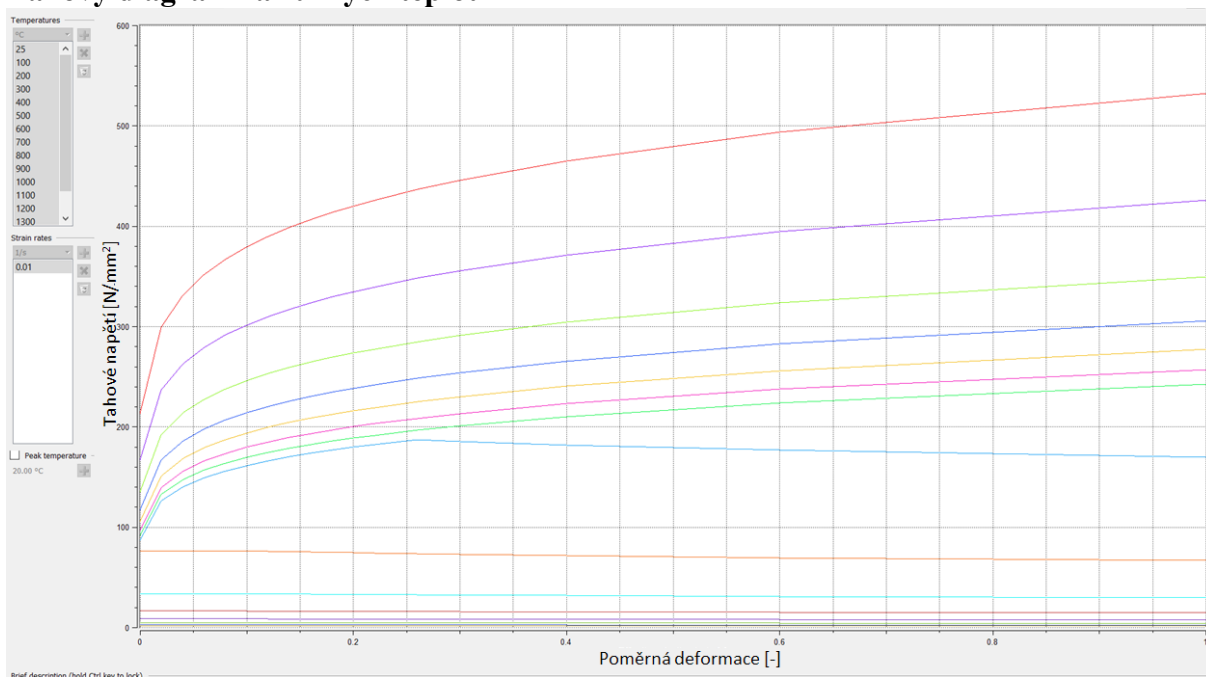
Graf 3. Závislost specifické tepelné kapacity na změně teploty pro ocel S235 [20]

Koeficient teplotní roztažnosti



Graf 4. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti na změně teploty pro ocel S235 [20]

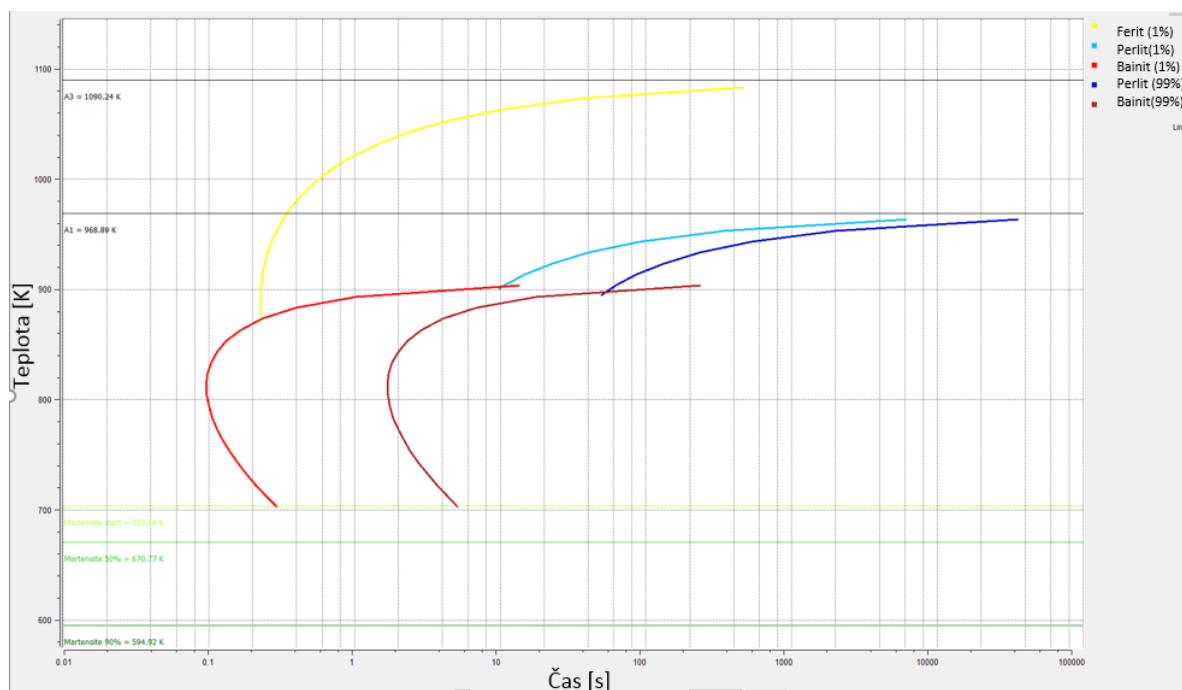
Tahový diagram za různých teplot



Graf 5. Tahový diagram za různých teplot pro ocel S235 [20]

Horní červená křivka značí tahový diagram pro ocel za teploty 25°C. Druhá nejvyšší pak ocel za teploty 100°C. Následující křivky a k nim odpovídající teploty zobrazuje Graf 5.

ARA diagram



Graf 6. ARA diagram pro ocel S235 [20]

6.8.2. Ocel A576 – 1018HR

Ocel z níž jsou vyrobeny tyčové dílce sestavy (PIN HINGE, STOP RH COVER).
Chemické složení

Prvek	C	Mn	P	S	Si	Fe
Množství [hm.%]	0,15-0,2	0,6-0,9	0,04 max.	0,06 max	0,15-0,35	zbytek

Tab. 6 Chemické složení oceli A576-1018HR [17]

Vlastnosti materiálu

- Tvrdost – 126HB
- Pevnost v tahu – 370 N.mm²
- Modul pružnosti – 205 GPa
- Poissonovo číslo – 0,29

Svařitelnost

Nízkouhlíková ocel je dobře svařitelná všemi běžnými svařovacími metodami. Svařování není doporučeno pokud ocel prošla karbonitridováním či cementováním. Ocel nevyžaduje předehřev pro svařování. [17,18]

V data bance softwaru Simufact.welding, není tato ocel zanesena. Pro simulaci byly použity data podobné oceli a to S355J2G3.

6.8.3. Ocel S355J2G3

- S – ocel pro ocelové konstrukce
- 355 – Re 355 N.mm² (mez kluzu)
- J2 – záruka nárazové práce 27J při teplotě – 20°C
- G3 – způsob dezoxidace

Chemické složení

Prvek	Al	C	Fe	Mn	N	P	S	Si
Množství [hm.%]	0,05	0,17	98,127	1,6	0,005	0,017	0,011	0,2

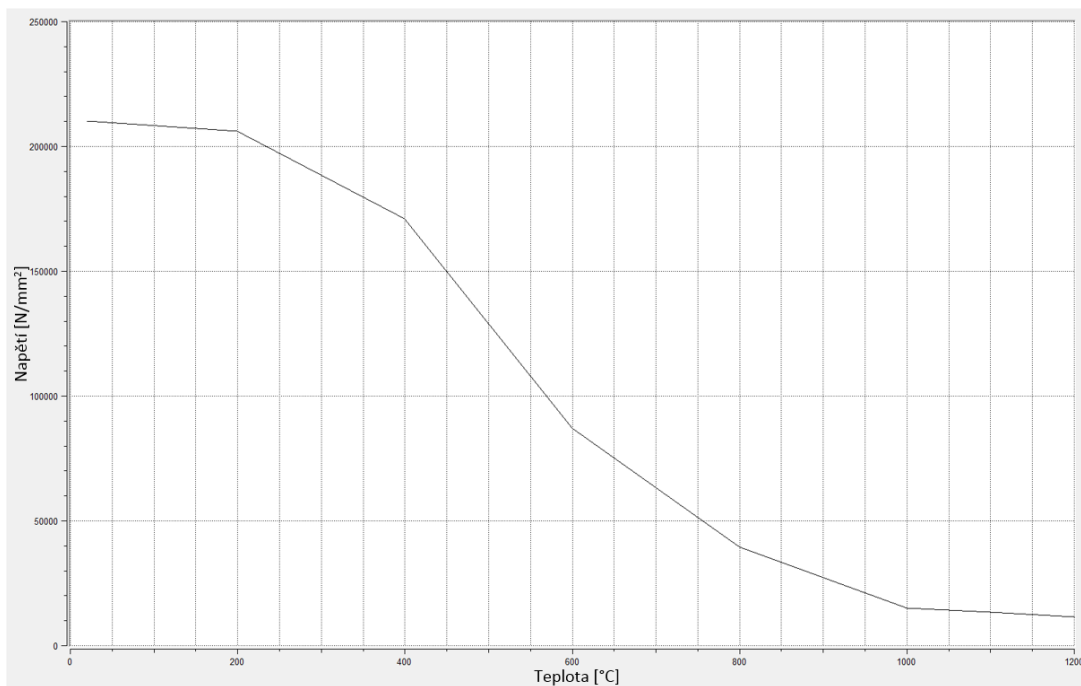
Tab. 7. Chemické složení oceli S355 [20]

Chemické složení uvedené v Tab. 7 je přesně použito při simulaci.

Vlastnosti materiálu

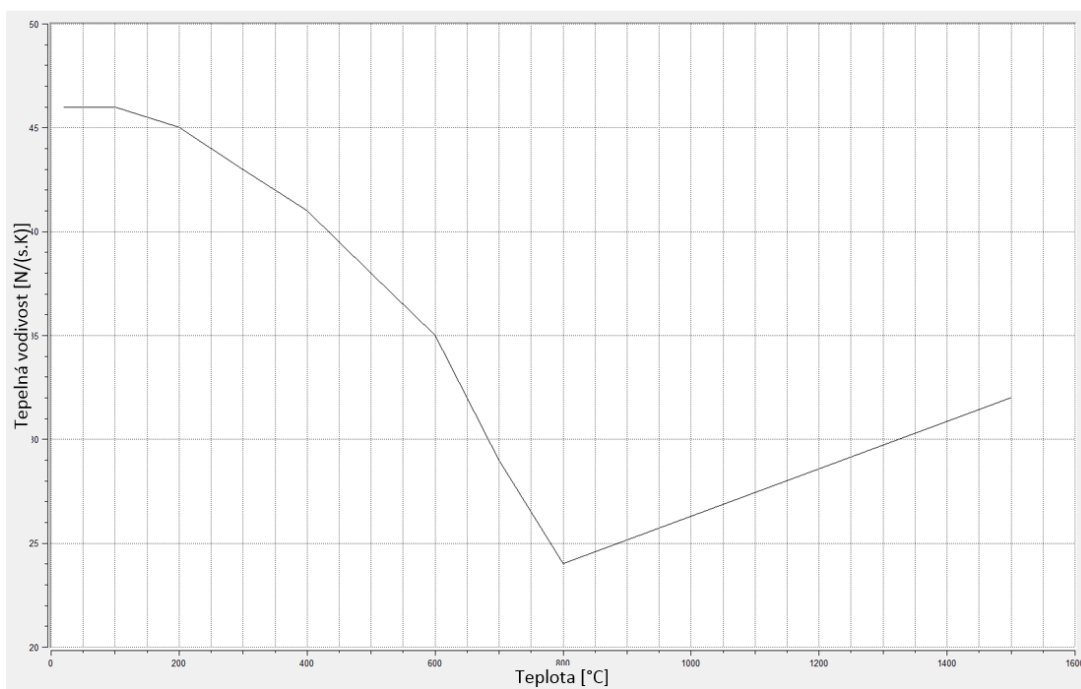
- Disipační faktor – 0,9 [-]
- Bod tavení – 1500 °C
- Bod tuhnutí – 1450 °C
- Latentní teplo – 256 KJ/kg

Mechanické vlastnosti – Youngův modul



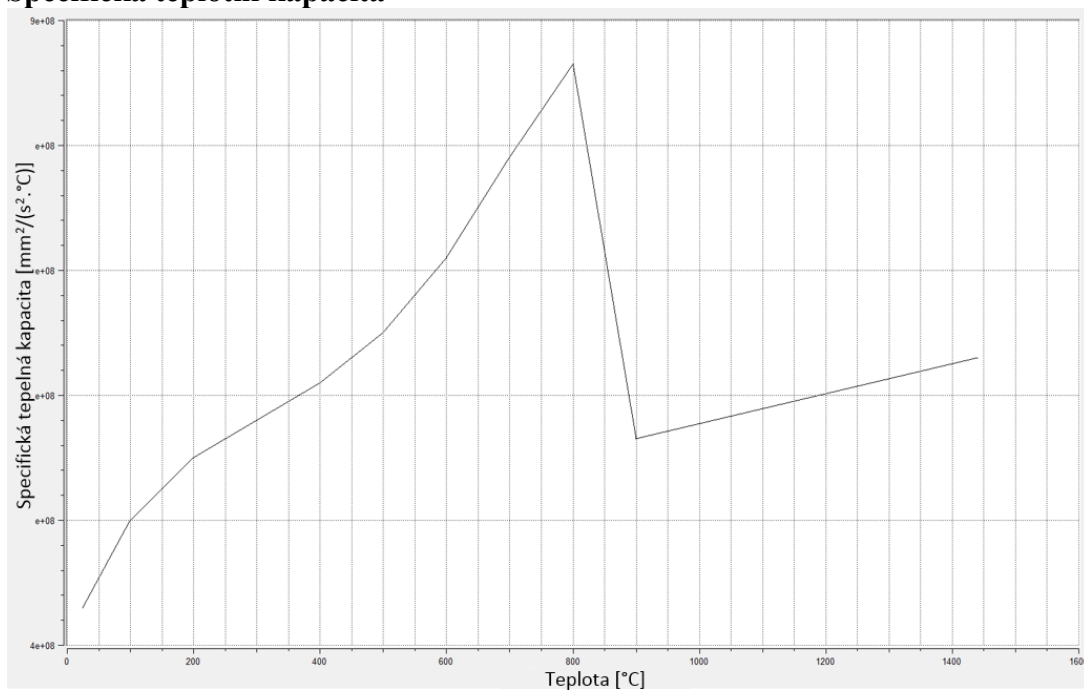
Graf 7. Závislost Youngova modulu na změně teploty pro ocel S355[20]

Tepelná vodivost



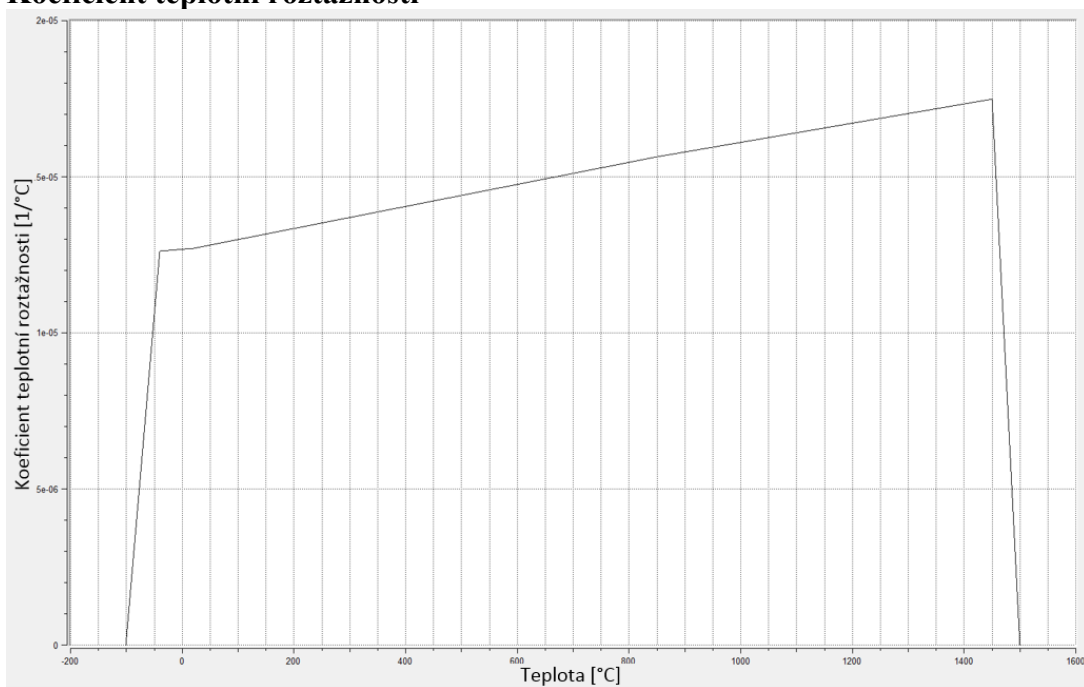
Graf 8. Závislost tepelné vodivosti na změně teploty pro ocel S355 [20]

Specifická teplotní kapacita



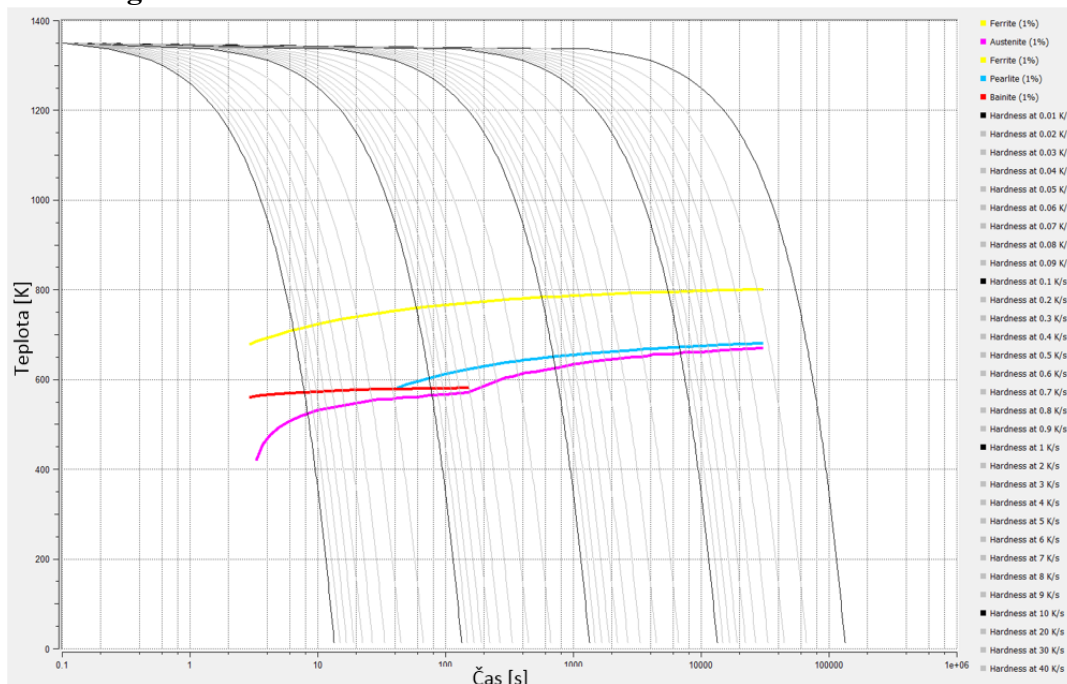
Graf 9. Závislost specifické teplotní kapacity na změně teploty pro ocel S355 [20]

Koeficient teplotní roztažnosti

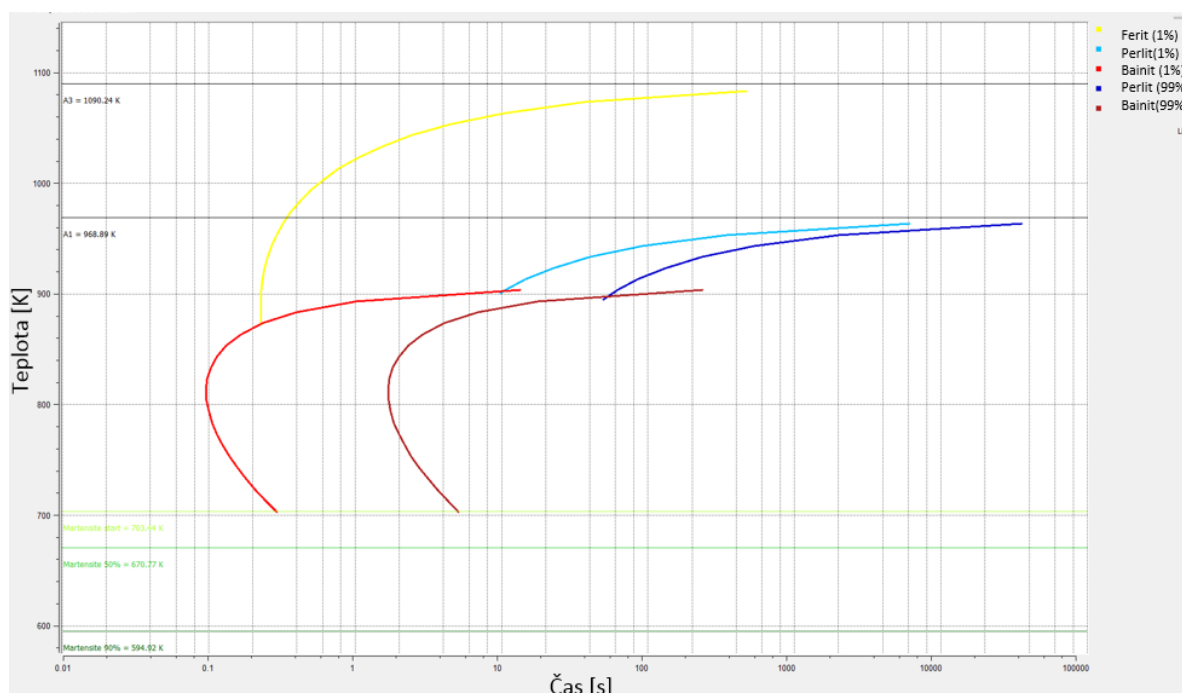


Graf 10. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti na změně teploty pro ocel S355 [20]

ARA diagram – fázové transformace

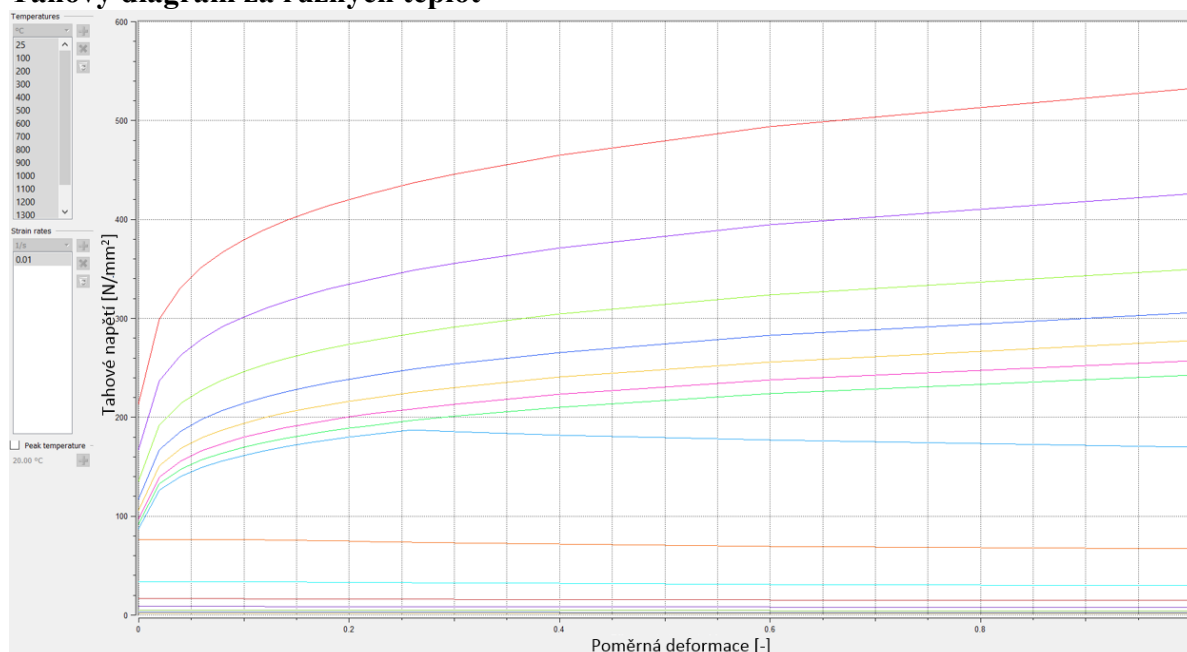


Graf 11. ARA diagram pro ocel S355 [20]



Graf 12. ARA diagram pro ocel S355 [20]

Tahový diagram za různých teplot

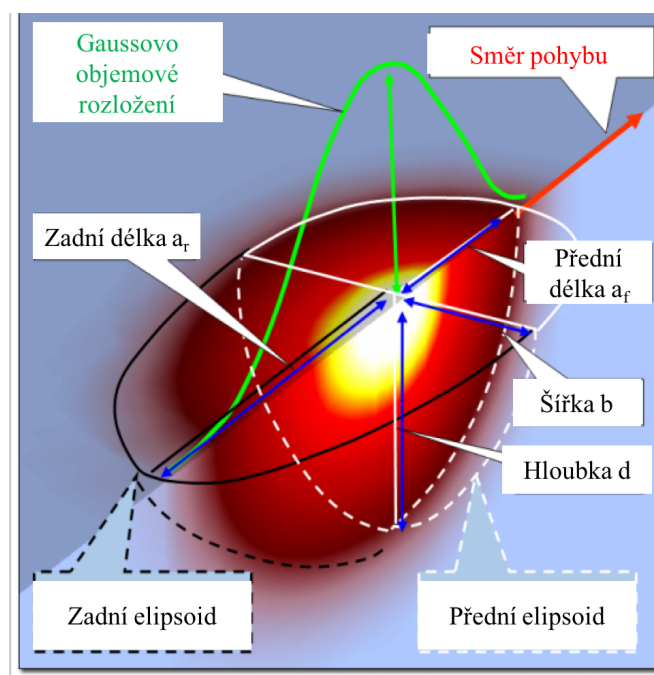


Graf 13. Tahový diagram za různých teplot pro ocel S355 [20]

Horní červená křivka značí tahový diagram pro ocel za teploty 25 °C. Druhá nejvyšší pak ocel za teploty 100 °C. Následující křivky a k nim odpovídající teploty zobrazuje Graf 13.

6.9. DEFINICE TEPELNÉHO ZDROJE

Svařování dílce probíhá ručně, metodou MAG. Pro popis vneseného tepla touto metodou se v programu Simufact.welding využívá speciální matematický model tepelného zdroje, Goldakův model, viz Obr. 32.



Obr. 32. Goldakův model tepelného zdroje [19]

Parametry potřebné k definování zdroje jsou následující:

- Rychlost svařování,
- proud,
- napětí,
- účinnost,
- rozměry tepelného zdroje.
 - přední délka – a_f ,
 - zadní délka - a_r ,
 - šířka – b ,
 - hloubka – d .

[19]

6.9.1. Rychlost svařování

Stanovení rychlosti při ručním svařování proběhlo na základě měření třech kusů. Rychlost svařování byla počítána pro každý svar a výsledné rychlosti zprůměrovány. Výsledek měření pro jeden svařenec je zřejmý z Tab. 8. Měření probíhalo formou zaznamenání celého procesu od upnutí svařenců, stehování, svařování až do vyjmutí z přípravku na video. Na základě nahrávky se díky analýze časové stopy mohla zjistit doba trvání svařovacího procesu. Odměření dráhy svarové housenky z CAD modelu bylo možné vyhodnotit rychlost svařování. Z videa byly také určeny prodlevy mezi jednotlivými svary. Ty jsou následně použity pro přesné zachycení svařovací sekvence.

	start				stop				doba svař. [s]	dráha [mm]	rychlost [cm/min]
	min	sek	set	$\Sigma(\text{setin})$	min	sek	set	$\Sigma(\text{setin})$			
svařenec č. 1											
1	2	41	613	161613	2	45	517	165517	3,904	23	35,35
2	2	47	994	167994	2	51	131	171131	3,137	23	43,99
3	2	54	878	174878	2	58	14	178014	3,136	23	44,01
4	3	9	161	189161	3	12	98	192098	2,937	23,785	48,59
5	3	18	709	198709	3	22	934	202934	4,225	30	42,60
6	3	24	988	204988	3	28	759	208759	3,771	35	55,69
7	3	36	349	216349	3	40	153	220153	3,804	19,35	30,52
8	3	42	368	222368	3	46	931	226931	4,563	31,12	40,92
9	3	52	30	232030	3	56	642	236642	4,612	20,48	26,64
10	3	58	348	238348	4	4	6	244006	5,658	32,367	34,32
11	4	29	995	269995	4	37	373	277373	7,378	68,379	55,61
12	4	43	747	283747	4	48	940	288940	5,193	28,697	33,16
13	5	0	83	300083	5	7	491	307491	7,408	46,179	37,40
14	5	10	932	310932	5	15	608	315608	4,676	29,783	38,22
15	5	25	824	325824	5	31	864	331864	6,04	30,465	30,26
16	5	40	400	340400	5	45	700	345700	5,3	30,915	35,00
17	5	47	927	347927	5	55	701	355701	7,774	31,712	24,48

Tab. 8. Náměry ze svařování

Vyhodnocení prodlev (rozestupů mezi jednotlivými svary) zaznamenává Tab. 9.

svar	rel. Start	rel. Stop	rozestup
1	0,00	3,90	0,00
2	6,38	9,52	2,48
3	13,27	16,40	3,75
4	27,55	30,49	11,15
5	37,10	41,32	6,61
6	43,38	47,15	2,05
7	54,74	58,54	7,59
8	60,76	65,32	2,22
9	70,42	75,03	5,10
10	76,74	82,39	1,71
11	108,38	115,76	25,99
12	122,13	127,33	6,37
13	138,47	145,88	11,14
14	149,32	154,00	3,44
15	164,21	170,25	10,22
16	178,79	184,09	8,54
17	186,31	194,09	2,23

Tab. 9. Vyhodnocení náměrů - stanové časových rozestupů svarů

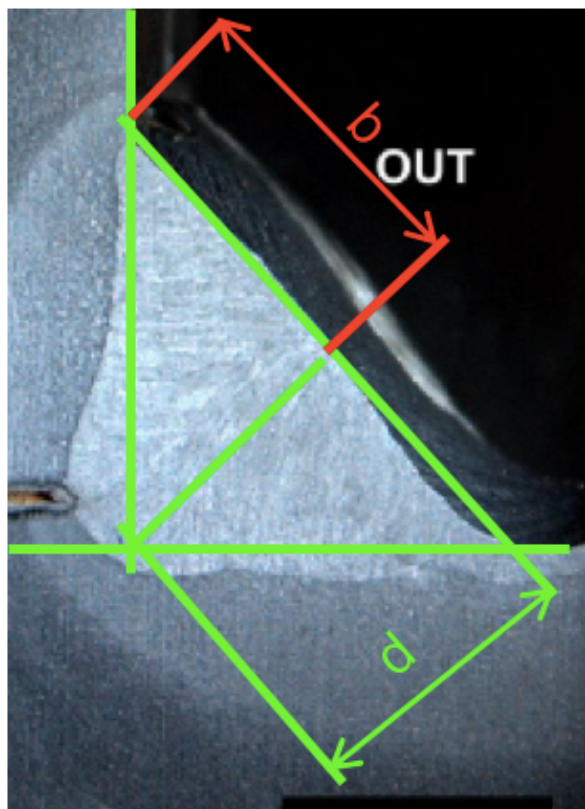
Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 10.

6.9.2. Proud, napětí a účinnost

Hodnoty proudu a napětí jsou určeny přímo ze svařovacího zdroje (ampérmetr a voltmetr). Z těchto hodnot bylo programem vypočítáno množství vneseného tepla. Hodnota účinnosti byla zvolena na základě konzultace s firmou MSC.Software.

6.9.3. Rozměry tepelného zdroje

Rozměry potřebné pro přesné definování tepelného zdroje je možné získat z makrovýbrusu svaru, či na základě odvozených koeficientů z parametrů svařování. Pro tuto simulaci byl použit makrovýbrus. Data byla získána z příčného výbrusu z naměřených dat pro diplomovou práci pana Ing. Alexandra Sedláčka: Optimalizace procesu svařování násady a výložníku zemního rypadla. Příčný výbrus pro dané parametry svařovacího procesu nalezneme na Obr. 33.



Obr. 33. Měření svarové lázně [21]

Rovnice pro výpočet délky a_f (6.9.3.1) a a_r (6.9.3.2).

$$a_f = 0,6 \cdot b \quad (6.9.3.1)$$

$$a_r = (2 \div 2,5) \cdot b \quad (6.9.3.2)$$

[19]

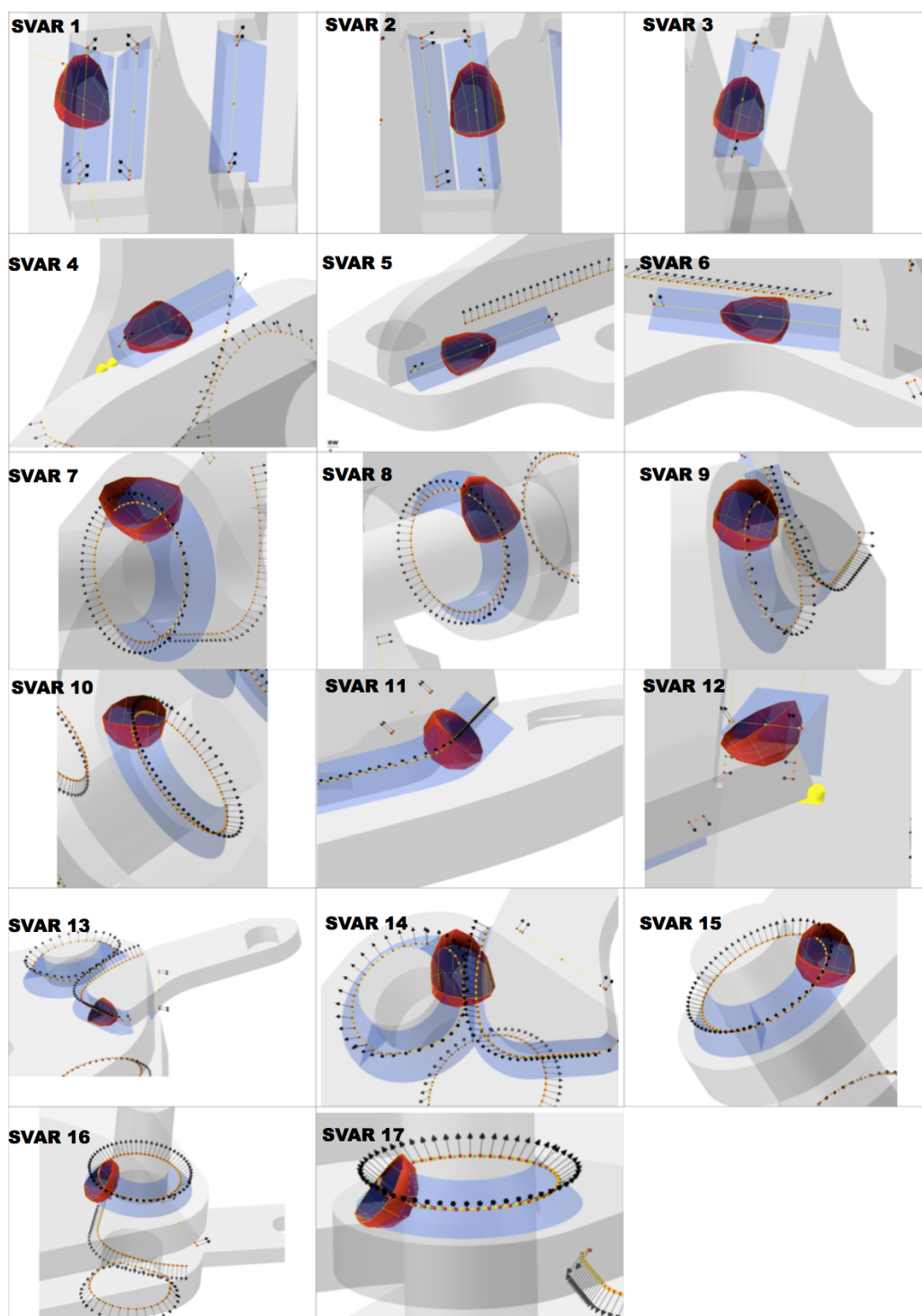
6.9.4. Naměřené hodnoty tepelného zdroje

Parametr	Rychlost svařování [cm/min]	Proud [A]	Napětí [V]	Účinnost [-]	a_f [mm]	a_r [mm]	b [mm]	d [mm]	Teplo [kJ/cm]
Hodnota	40	191	24	0,8	2	9	4	4	6,876

Tab. 10. Parametry svařovacího procesu

6.10. ČASOVÁ SEKVENCE A SMĚR SVAŘOVACÍHO ZDROJE

Pro správné definování pohybu tepelného zdroje (svařovacího hořáku) je nutné znát směr svařování. Ten je zřejmý z Obr. 20. Spolu se směrem svařování je nutné definovat natočení svarové lázně (úhel svařování). To by mělo být v případě koutového svaru 45° . Obr. 34 zachycuje kontrolu natočení tavné lázně v rámci jednotlivých svarů. Natočení svarové lázně je vidět na obrázku pomocí černých šipek, které reprezentují normálový směr k ploše nově vzniklého svaru.



Obr. 34. Kontrola natočení svarové lázně

Dalším parametrem je časové definování procesu, kdy je který svar zhotovován, a jaká je mezi nimi prodleva. Tyto parametry byly zjištěny z měření a jsou zobrazeny v Tab. 9.

Obr. 35. a Obr. 36 zobrazuje časové nastavení kladení jednotlivých svarů v průběhu času v softwaru.

Order	Trajectory	Length [m]	Start welding	End welding	Welding time	End time [s]
1	T_1	23.0	0.0	3.45	3.45	3.45
2	T_2	23.0	5.95	9.4	3.45	9.4
3	T_3	23.0	13.1	16.55	3.45	16.55
4	T_4	23.7848	28.05	31.6177	3.5677	31.6177
5	T_5	30.0	38.2177	42.7177	4.5	42.7177
6	T_6	35.0	45.2177	50.4677	5.25	50.4677
7	T_7	27.796	58.0677	62.2371	4.1694	62.2371
8	T_8	41.9786	64.4371	70.7339	6.2968	70.7339
9	T_9	29.3958	75.8339	80.2433	4.4094	80.2433
10	T_10	43.6805	81.9433	88.4954	6.5521	88.4954
11	T_11	69.9439	114.495	124.987	10.4916	124.987
12	T_12	28.6968	131.387	135.691	4.3045	135.691
13	T_13	51.8882	147.091	154.875	7.7832	154.875
14	T_15	41.1007	168.475	174.64	6.1651	174.64
15	T_16	44.4188	183.14	189.803	6.6628	189.803
16	T_17	42.7893	192.003	198.421	6.4184	198.421

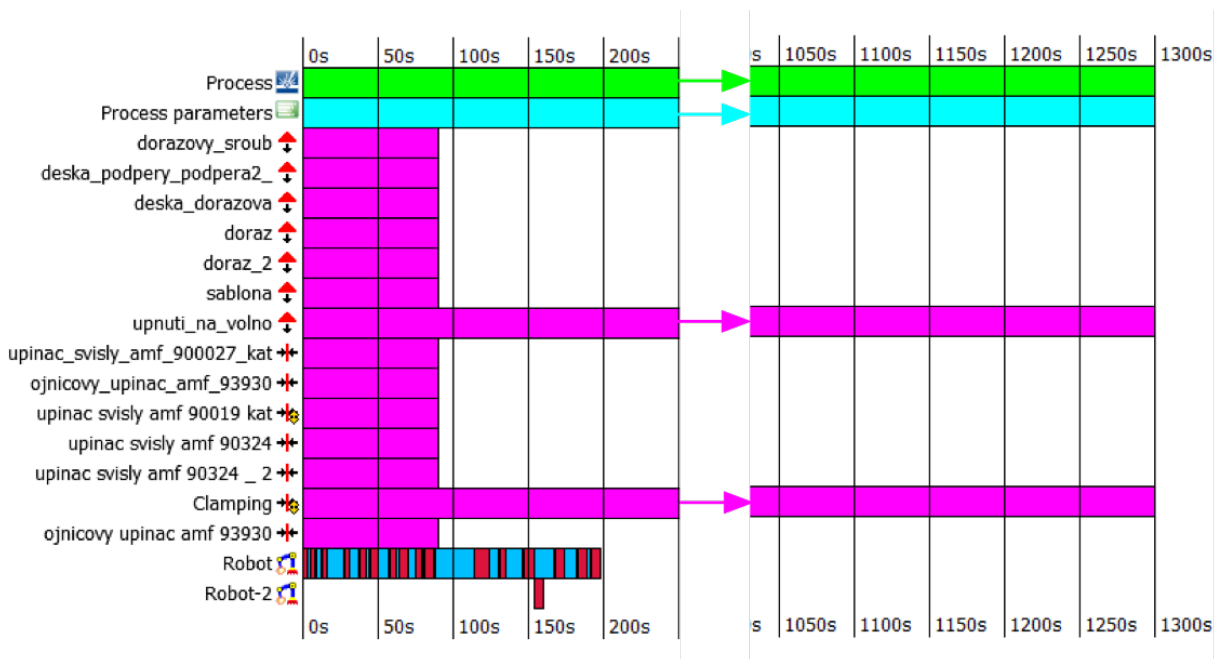
Obr. 35. Nastavení časové sekvence pro 1. Robota

Order	Trajectory	Length [m]	Start welding	End welding	Welding time	End time [s]
1	T_14	42.1474	154.0	160.322	6.3221	160.322

Obr. 36. Nastavení časové sekvence pro 2. Robota

Poznámka:

Z důvodu kvalitního grafického zobrazení je nutné rozdělit svary síťované obdélníkovými a čtyřstěnovými prvky do dvou „svařovacích robotů“. Pokud by nedošlo k rozdělení, svary by se zobrazily pouze jako příčné řezy. Z tohoto důvodu je 14. svar přiřazen jinému „svařovacímu robotu“. Z časového hlediska navazuje na 13. svar. Pro přehlednost na Obr. 37 sledujeme celkovou časovou posloupnost. Toto je jediný důvod proč je proces rozdělen na dva fiktivní svařeče (roboty).



Obr. 37. Časová posloupnost celého simulačního procesu

6.11. NASTAVENÍ ŘEŠIČE

Tato oblast je důležitá pro výpočet z hlediska rychlosti a přesnosti. V první řadě se definuje jaký výpočet je požadován (Termo-mechanické řešení, zahrnutí fázových přeměn), následuje nastavení paralelizace (rozdělení dílu na podsestavy a přiřazení počtu jader) a v poslední fázi se určí typ řešiče a doba výpočtu. Ta byla nastavena tak, aby bylo zaručené ochladnutí svařence na pokojovou teplotu. Vše je zachyceno v Tab. 11.

Konfigurace simulace	Termo-mechanické řešení	Pozn.
Fázové transformace	Ano	
Počet domén	8	*
Sdílená paměť paralelizace (počet jader)	1	**
Doba výpočtu	1300 s	
Řešič	Paradiso Direct Sparse / Multifrontal Sparse	***
Kontaktní tolerance	0,08 mm	****

Tab. 11. Základní nastavení řešiče

Poznámka

* Výpočetní model je rozdělen do 8 domén (Obr. 40). V každé je výpočet řešen odděleně a může být následně paralelizován užitím sdílené paměti. Celkový počet jader centrální procesorové jednotky (CPU) využívaných při simulaci je počet domén násoben počtem jader.

** Paralelní nastavení dovoluje výpočet využitím metody rozložení domény a paralelní výpočet s využitím sdílené paměti.

Paradiso Direct Sparse - Robustní přímý řešič, vhodný zejména pro větší úlohy obsahující paralelizaci.

Multifrontal Sparse – vhodný pro velké sestavy a paralelizaci

**** Jedná se o maximální vzdálenost, na které je možné vytvořit kontakt. Základní nastavení činilo 0,02mm. Po několika testech byla zvolena a odzkoušena hodnota 0,08 mm.

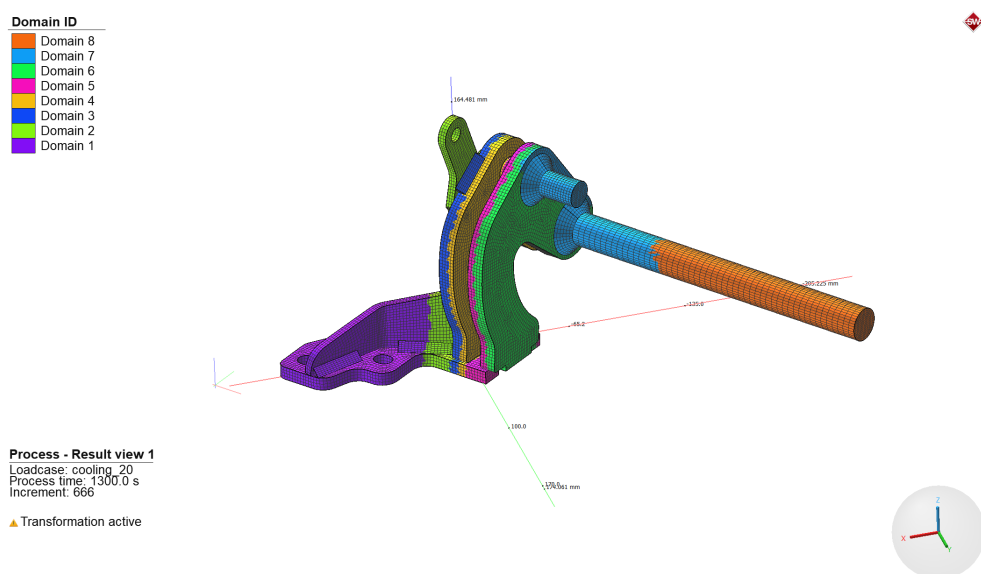
Ostatní nastavení bylo ponecháno v základním režimu. Viz Obr. 38 a Obr. 39.

Welding convergence settings	
Maximum nodal temperature change allowed:	<input type="text" value="100.0"/> K
Max. nodal temperature change allowed before updating material properties:	<input type="text" value="100.0"/> K
Max. allowed temperature tolerance in thermal iteration:	<input type="text" value="20.0"/> K
Maximum number of recycles:	<input type="text" value="-50"/>
Minimum number of recycles:	<input type="text" value="2"/>
Convergence test based on:	Residual
Initial stress stiffness control:	Normal-full contribution
Relative residual tolerance:	<input type="text" value="0.1"/> -
Relative displacement tolerance:	<input type="text" value="0.05"/> -

Obr. 38. Detailní nastavení svařovací konvergence

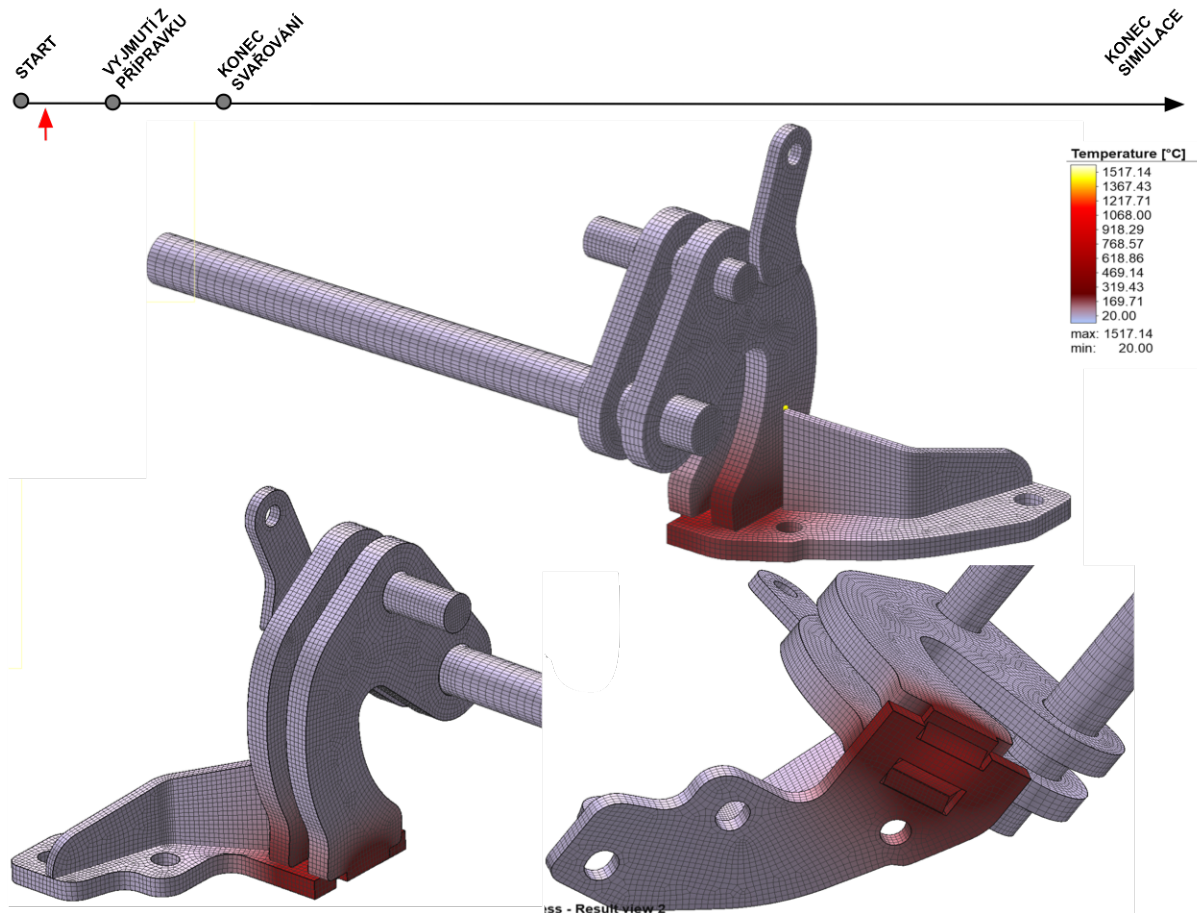
Cooling convergence settings	
Maximum nodal temperature change allowed:	<input type="text" value="100.0"/> K
Max. nodal temperature change allowed before updating material properties:	<input type="text" value="100.0"/> K
Max. allowed temperature tolerance in thermal iteration:	<input type="text" value="20.0"/> K
Maximum number of recycles:	<input type="text" value="-50"/>
Minimum number of recycles:	<input type="text" value="2"/>
Convergence test based on:	Residual or displacement
Initial stress stiffness control:	Normal-full contribution
Relative residual tolerance:	<input type="text" value="0.1"/> -
Relative displacement tolerance:	<input type="text" value="0.05"/> -

Obr. 39. Detailní nastavení chladicí konvergence

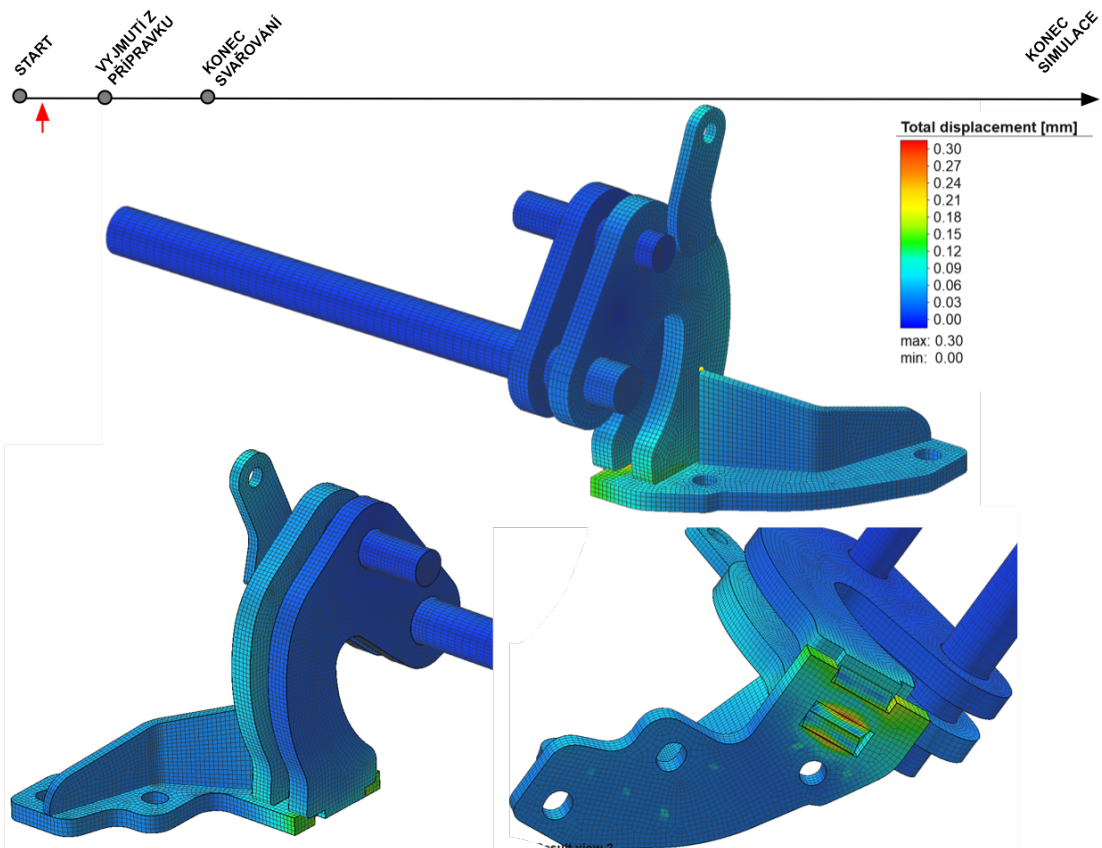


Obr. 40. Rozdělení modelu na výpočetní podsestavy (domény)

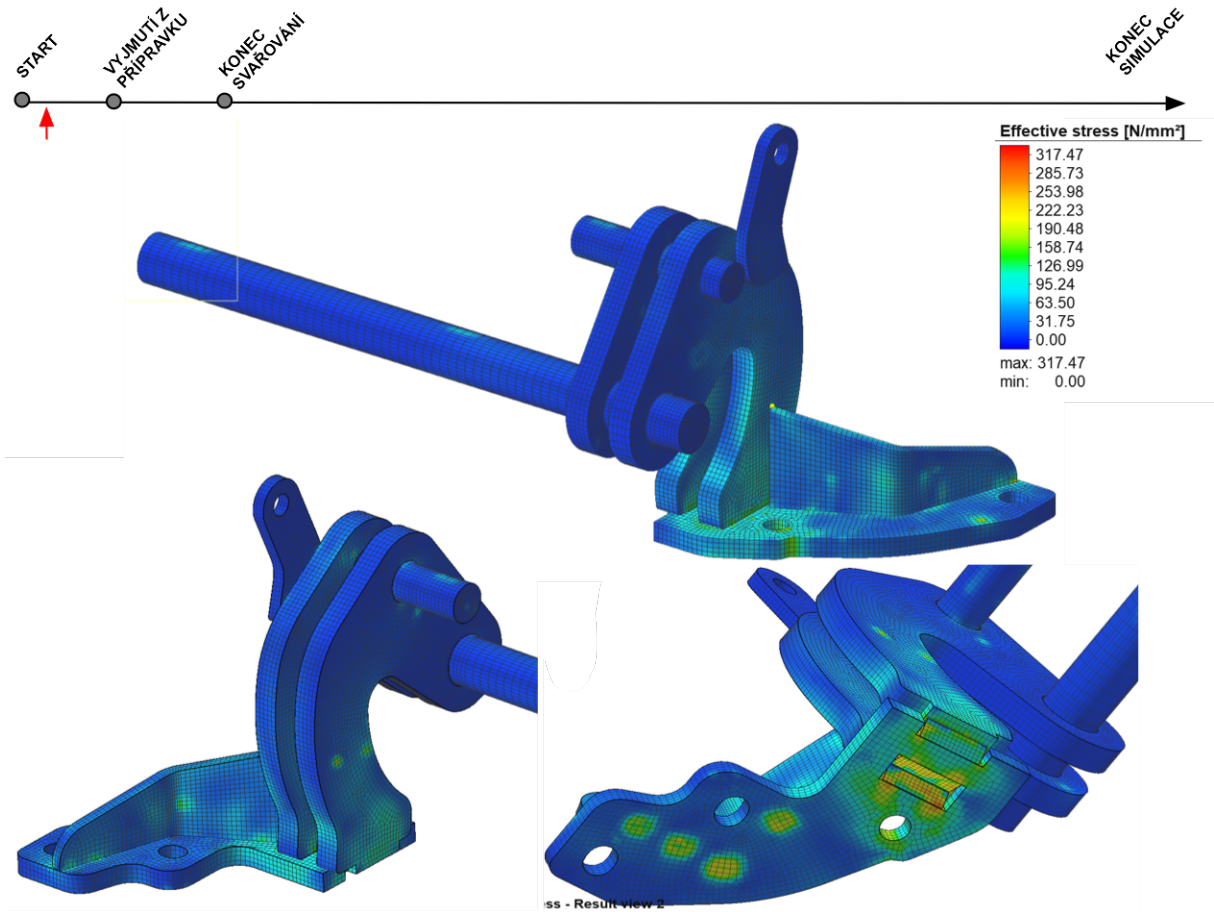
7. PRŮBĚH SIMULACE S4



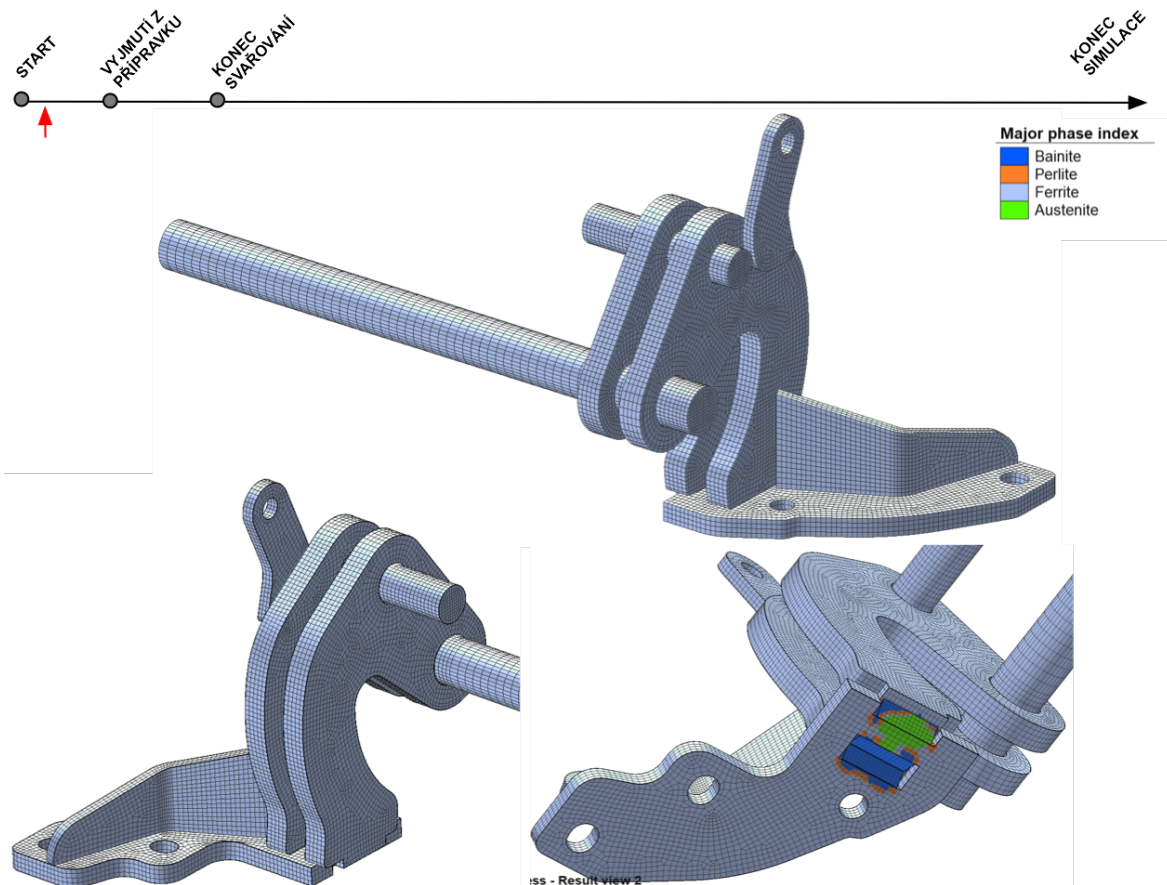
Obr. 41. Simulace procesu v čase 20s – teplota



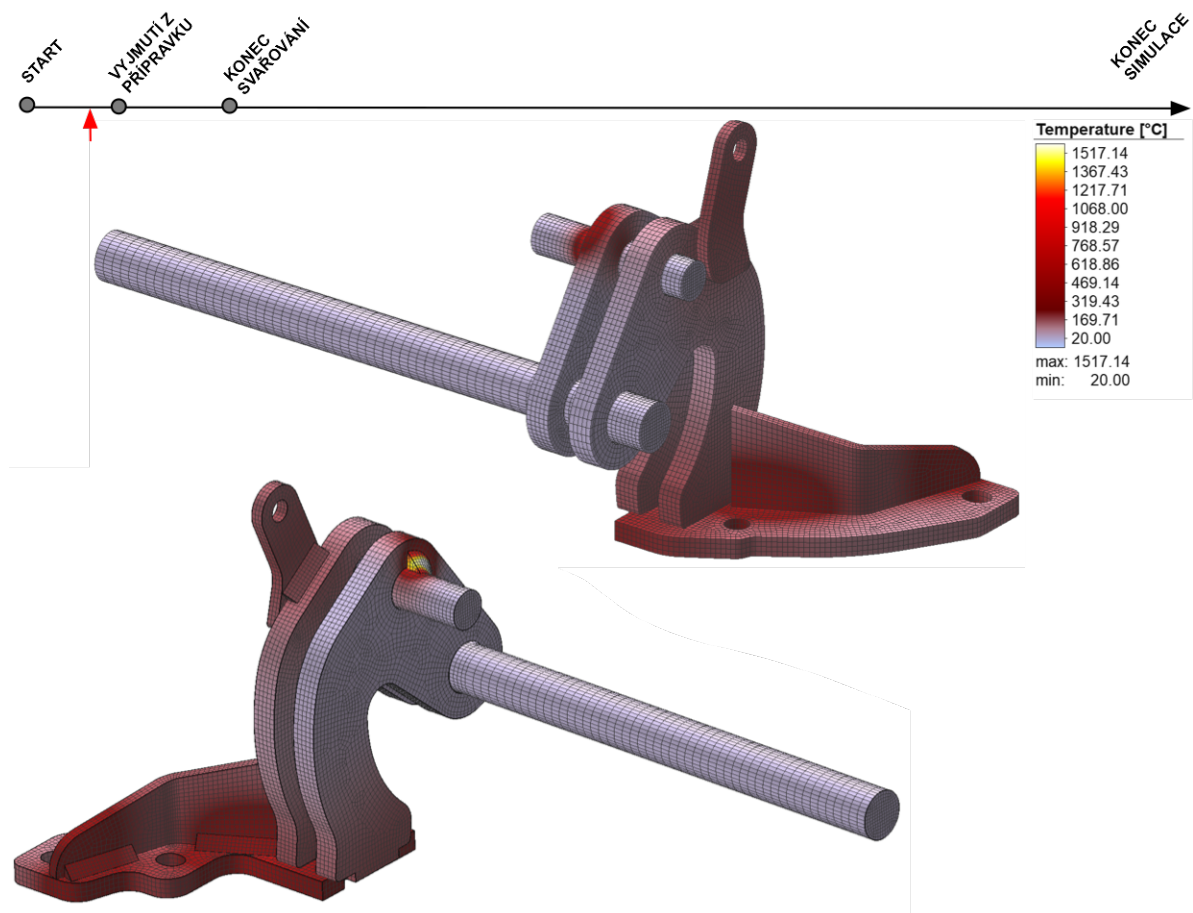
Obr. 42. Simulace procesu v čase 20s – deformace



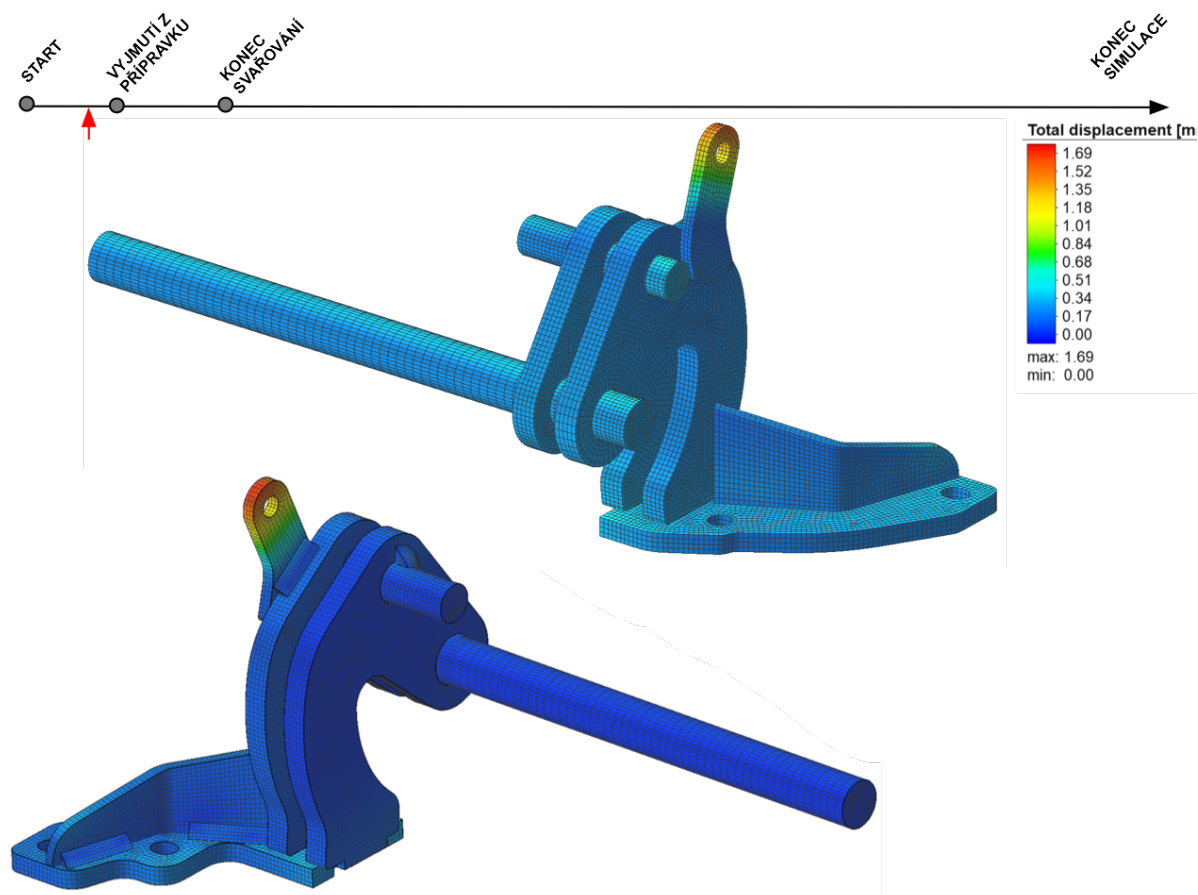
Obr. 43. Simulace procesu v čase 20s - vnitřní napětí



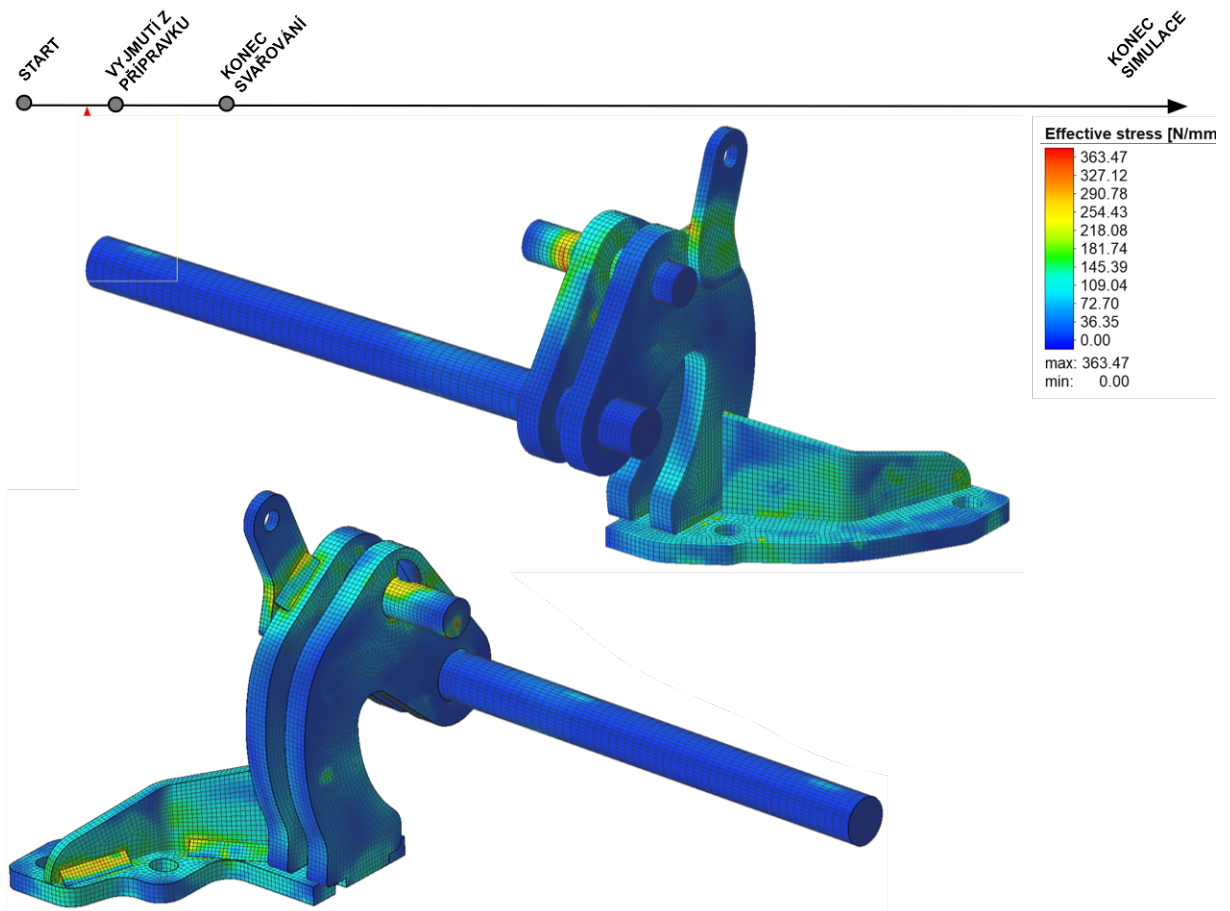
Obr. 44. Simulace procesu v čase 20s – fáze



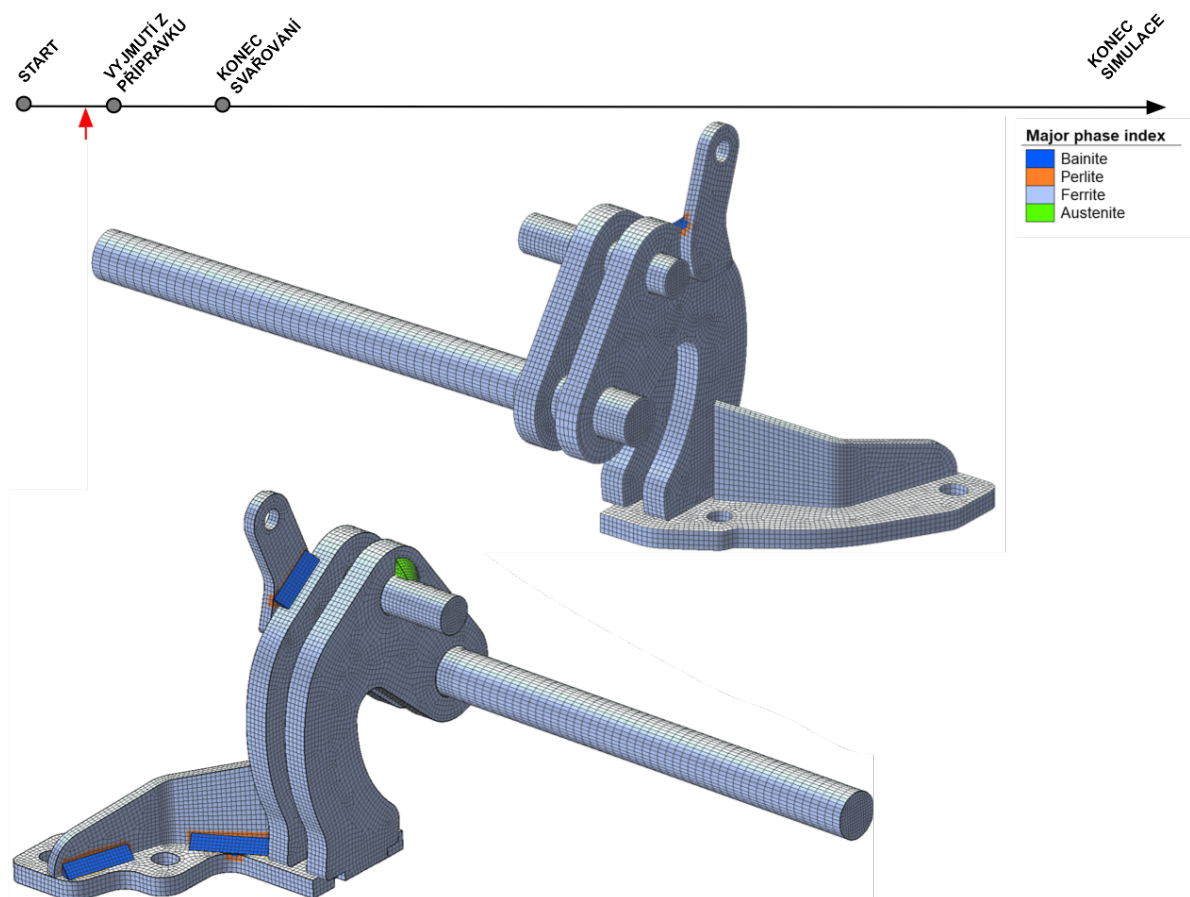
Obr. 45. Simulace procesu v čase 60s – teplota



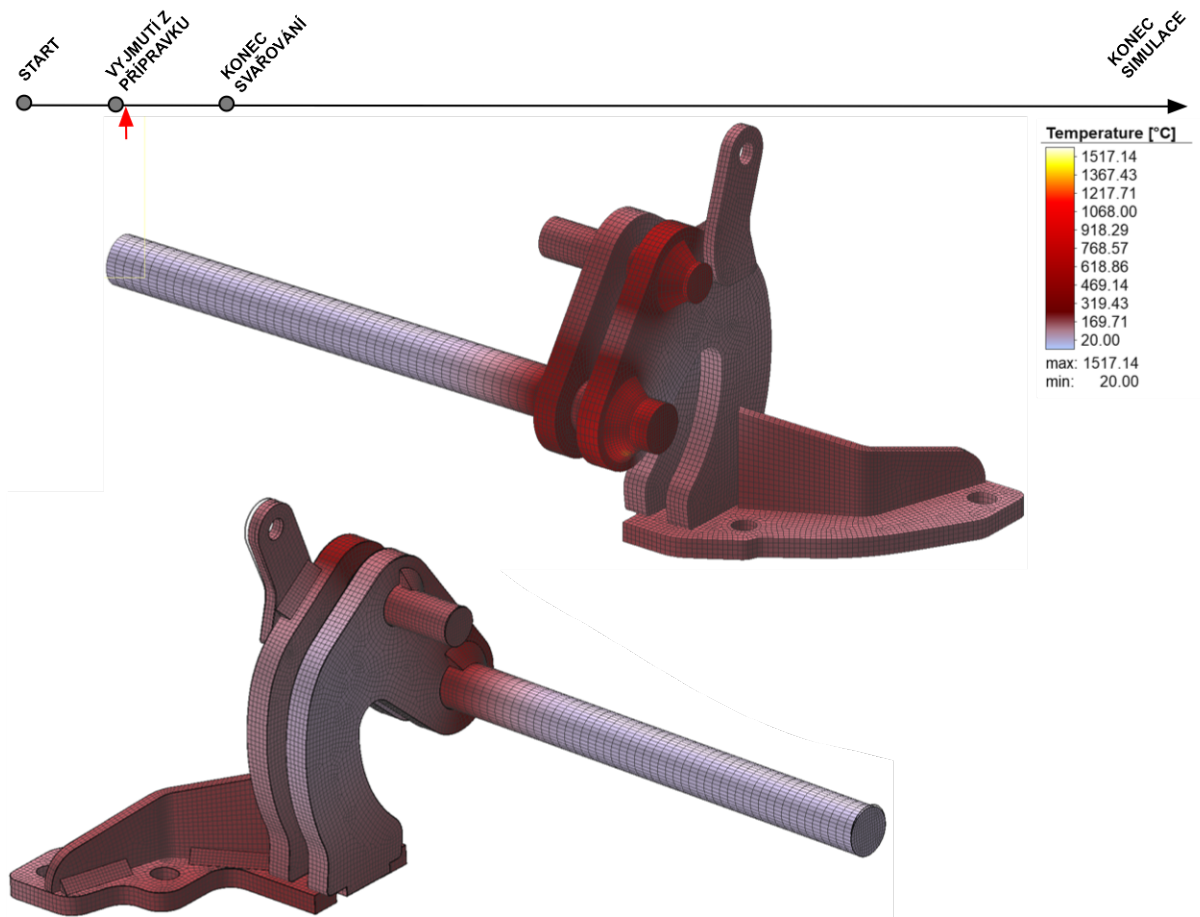
Obr. 46. Simulace procesu v čase 60s – deformace



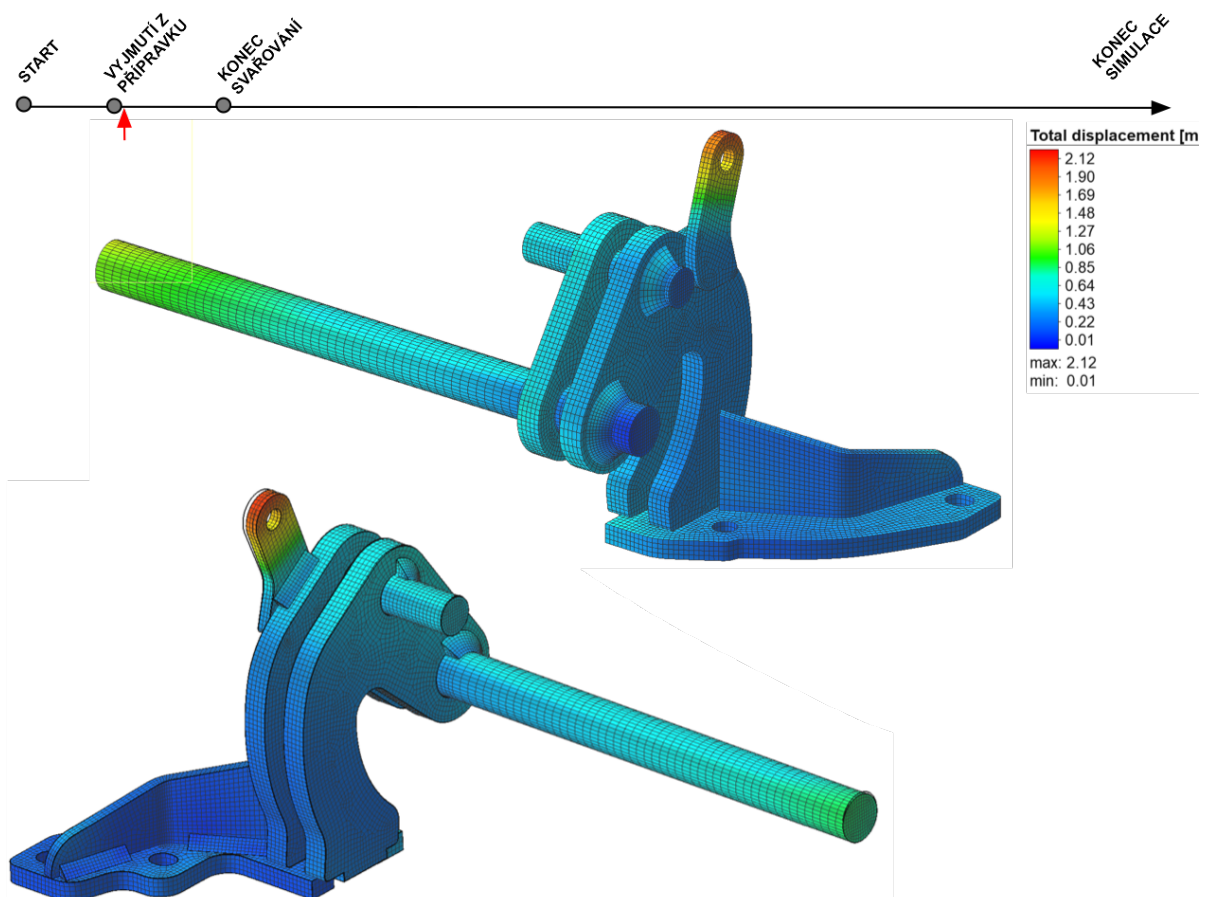
Obr. 47. Simulace procesu v čase 60s – vnitřní napětí



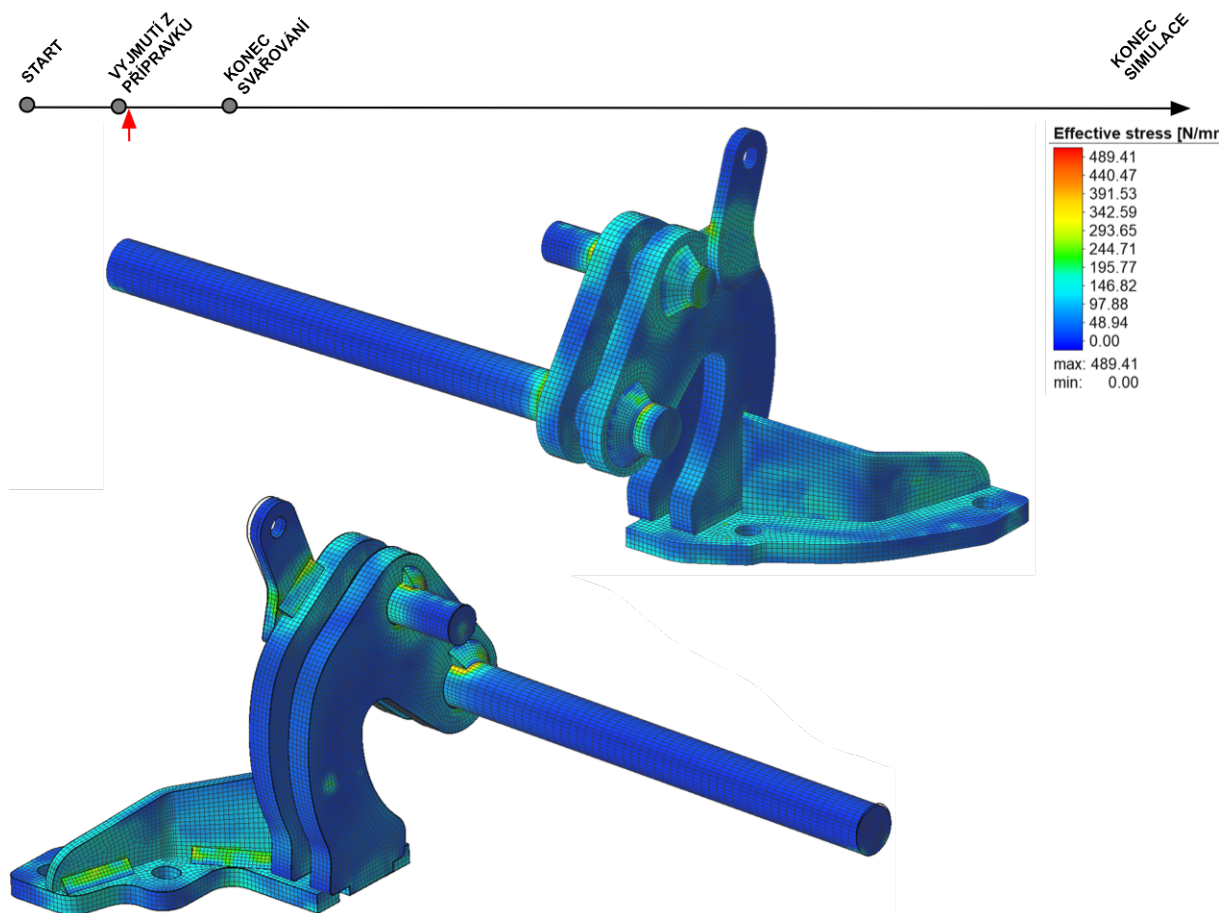
Obr. 48. Simulace procesu v čase 60s – fáze



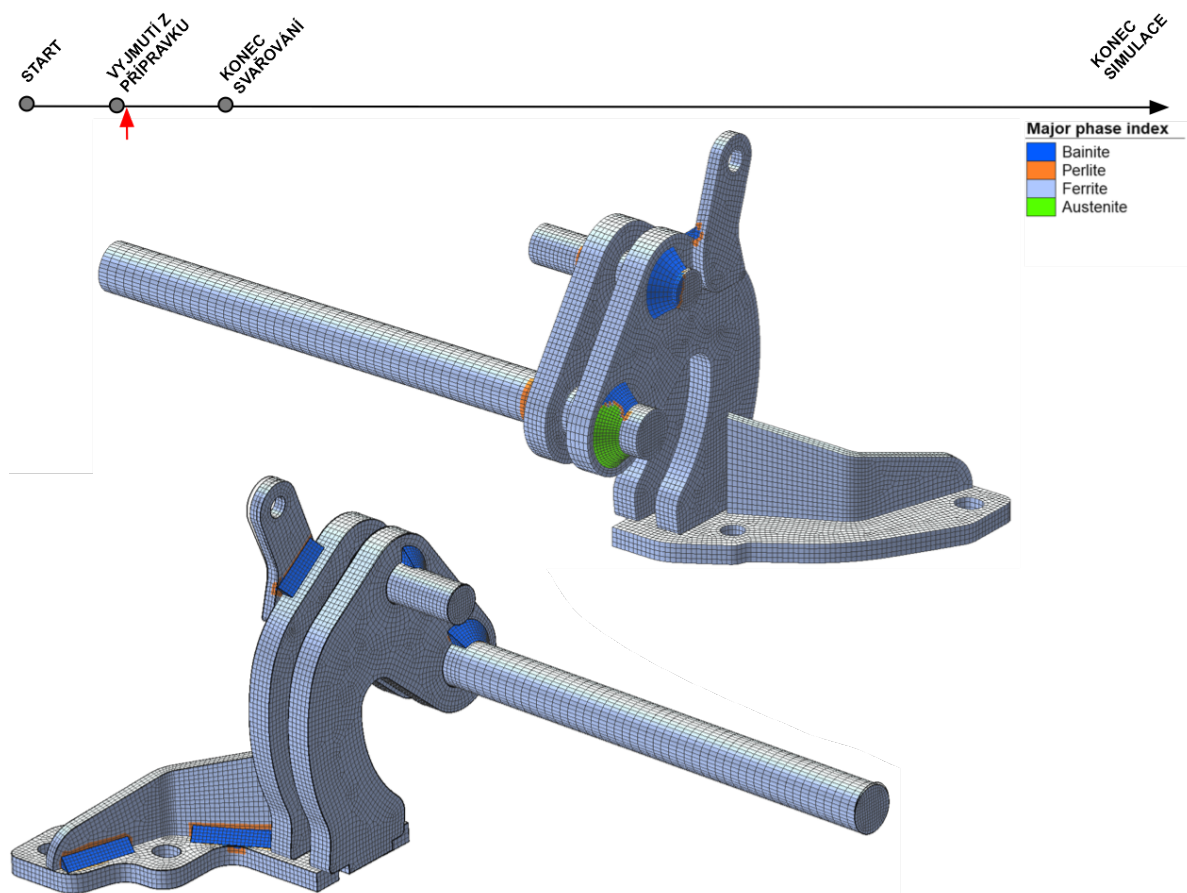
Obr. 49. Simulace procesu v čase 95s – teplota



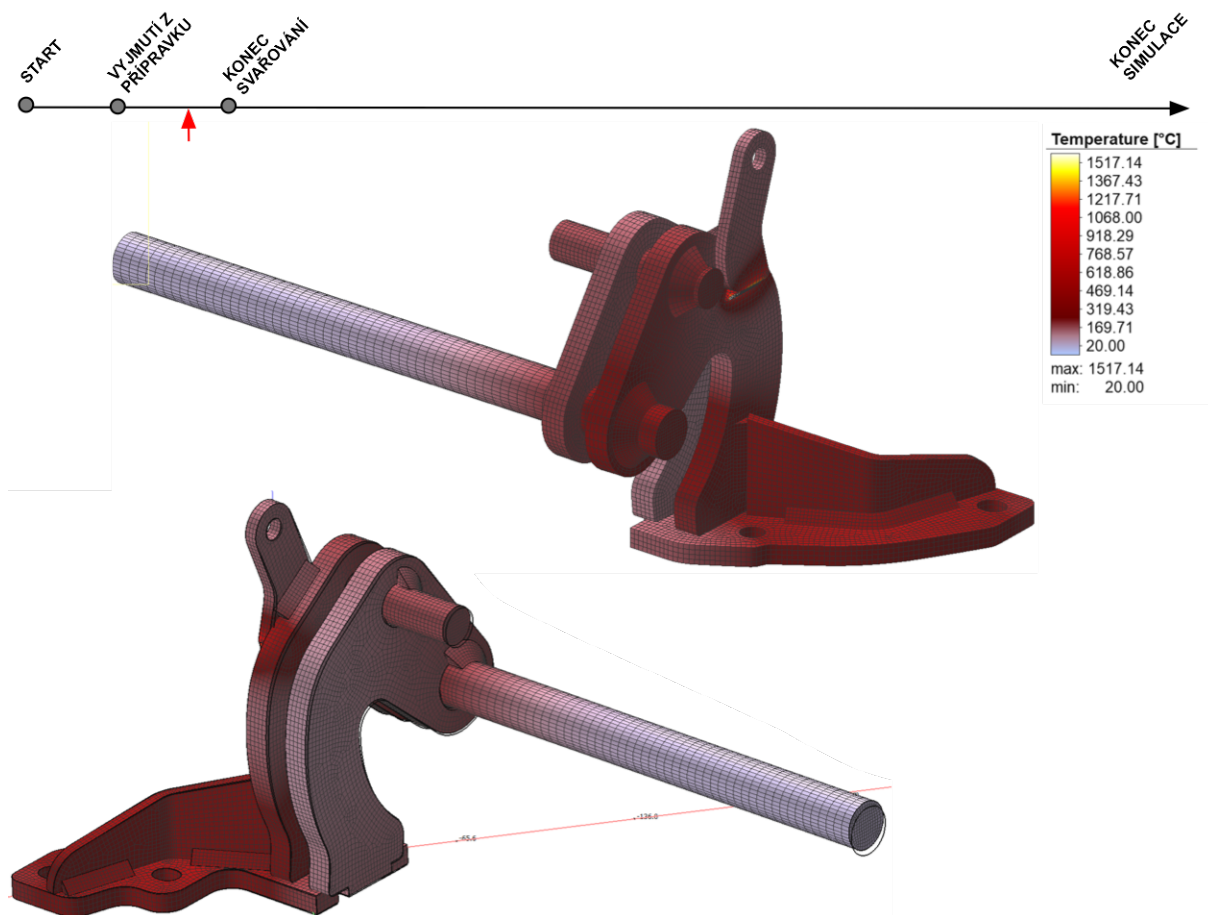
Obr. 50. Simulace procesu v čase 95s – deformace



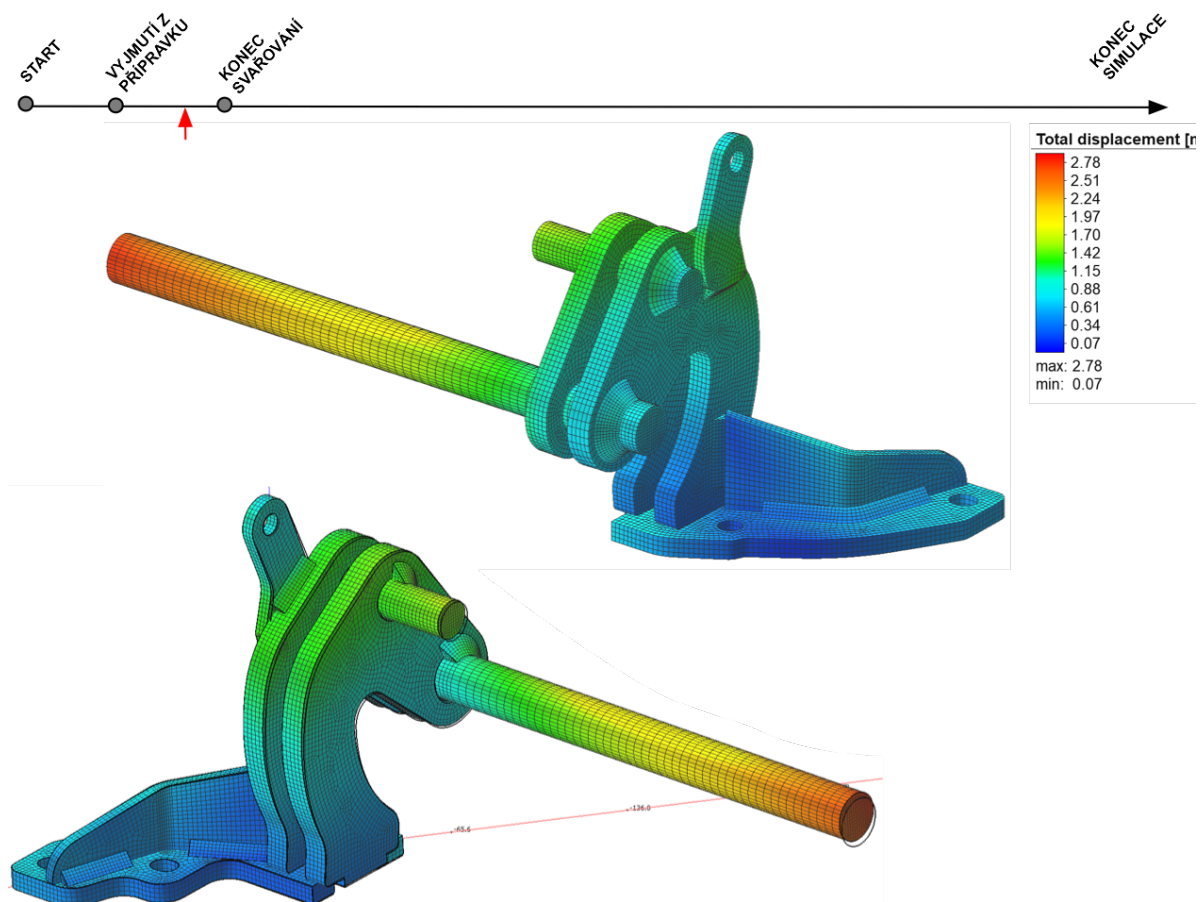
Obr. 51. Simulace procesu v čase 95s – vnitřní napětí



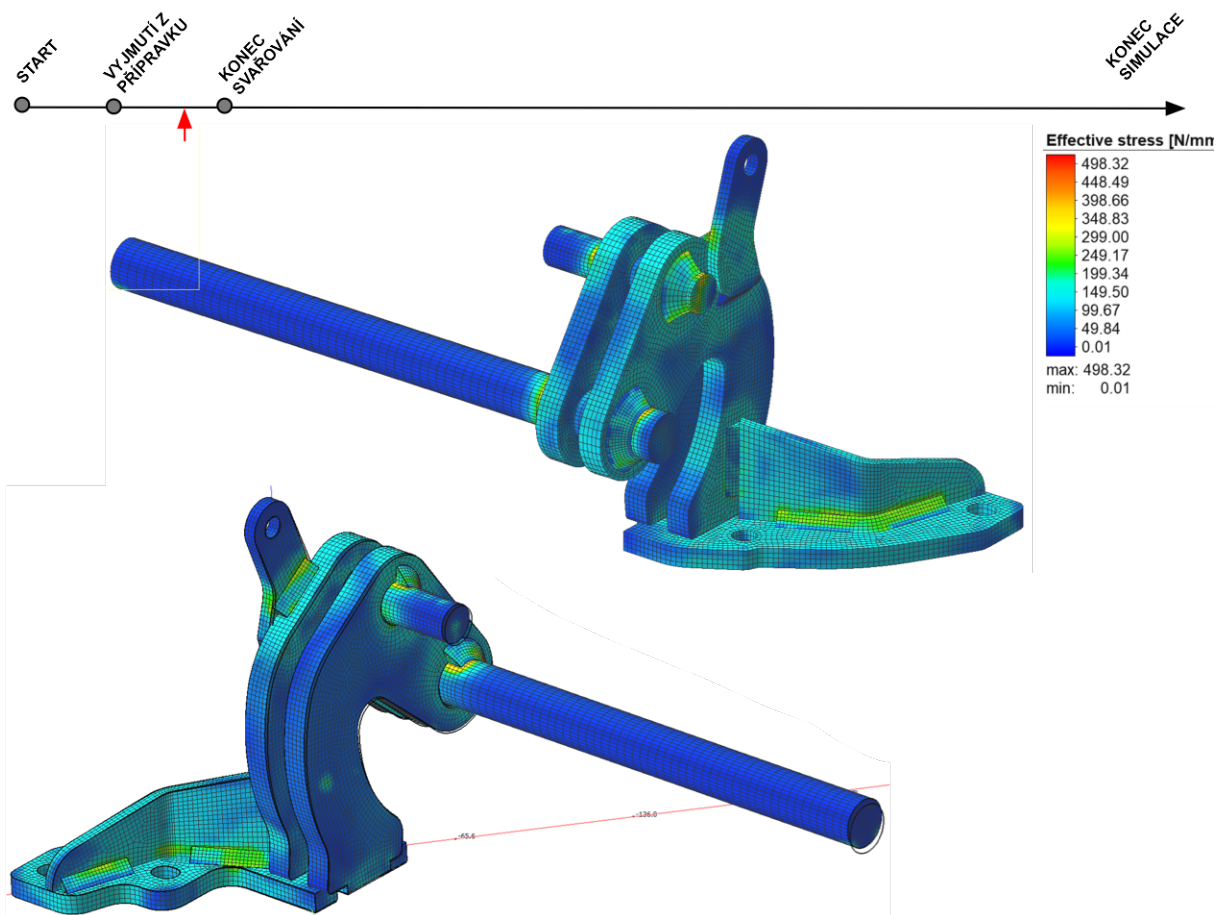
Obr. 52. Simulace procesu v čase 95s – fáze



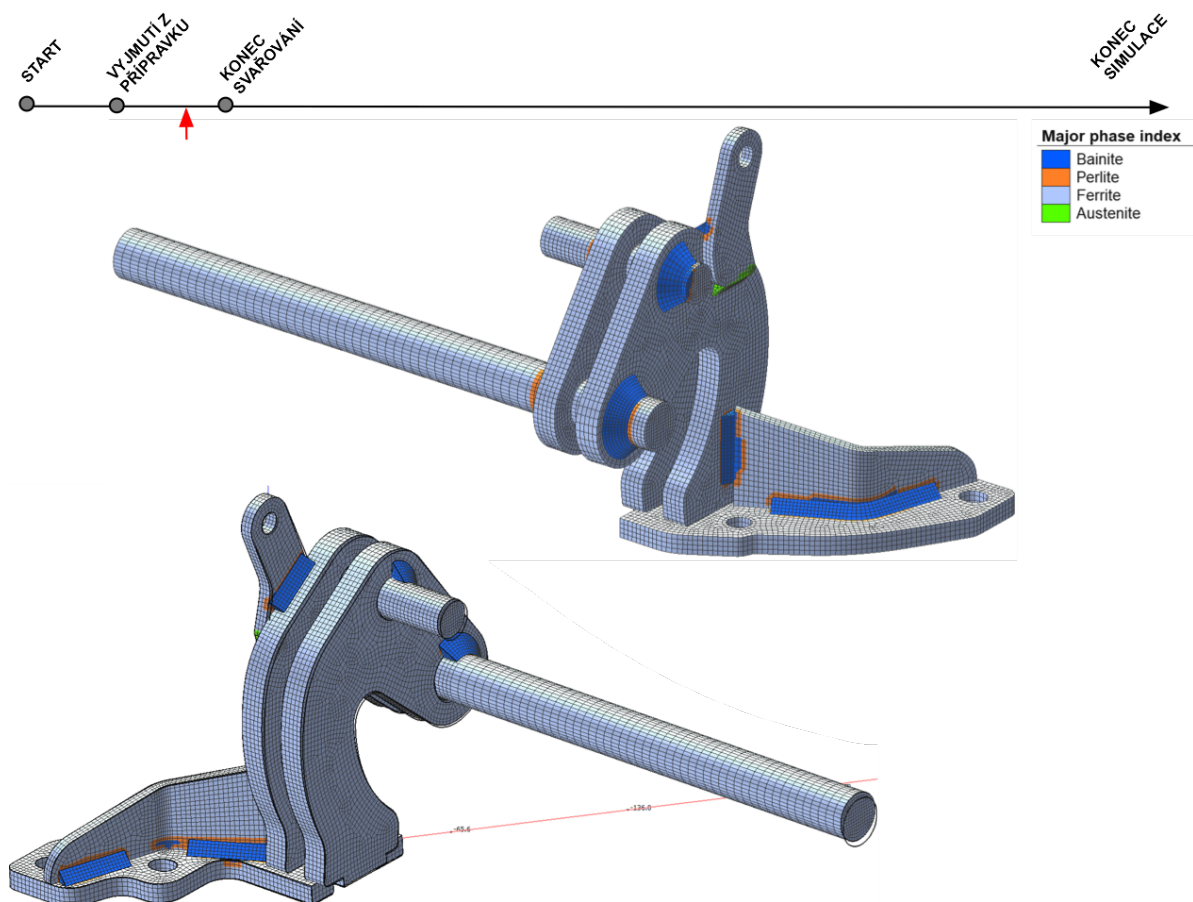
Obr. 53. Simulace procesu v čase 150s – teplota



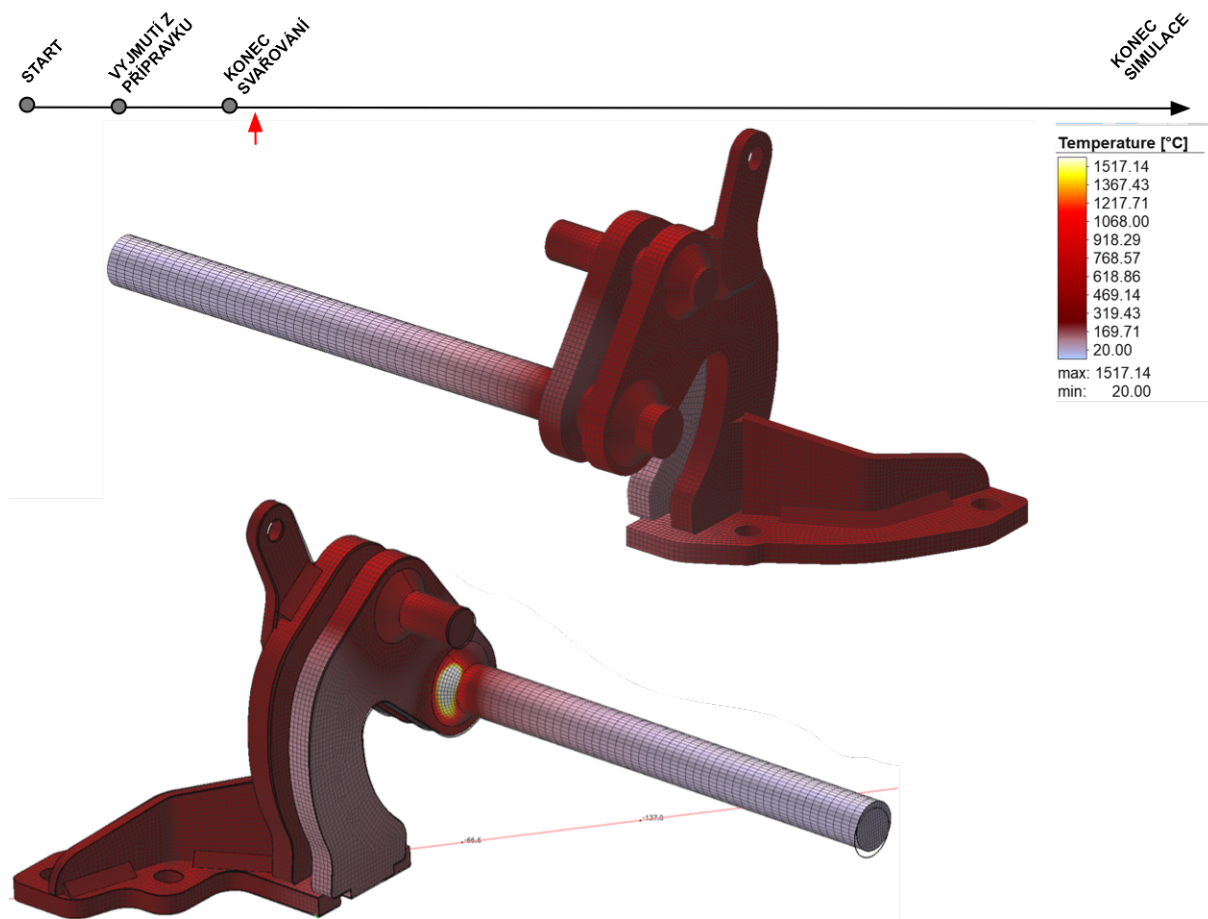
Obr. 54. Simulace procesu v čase 150s – deformace



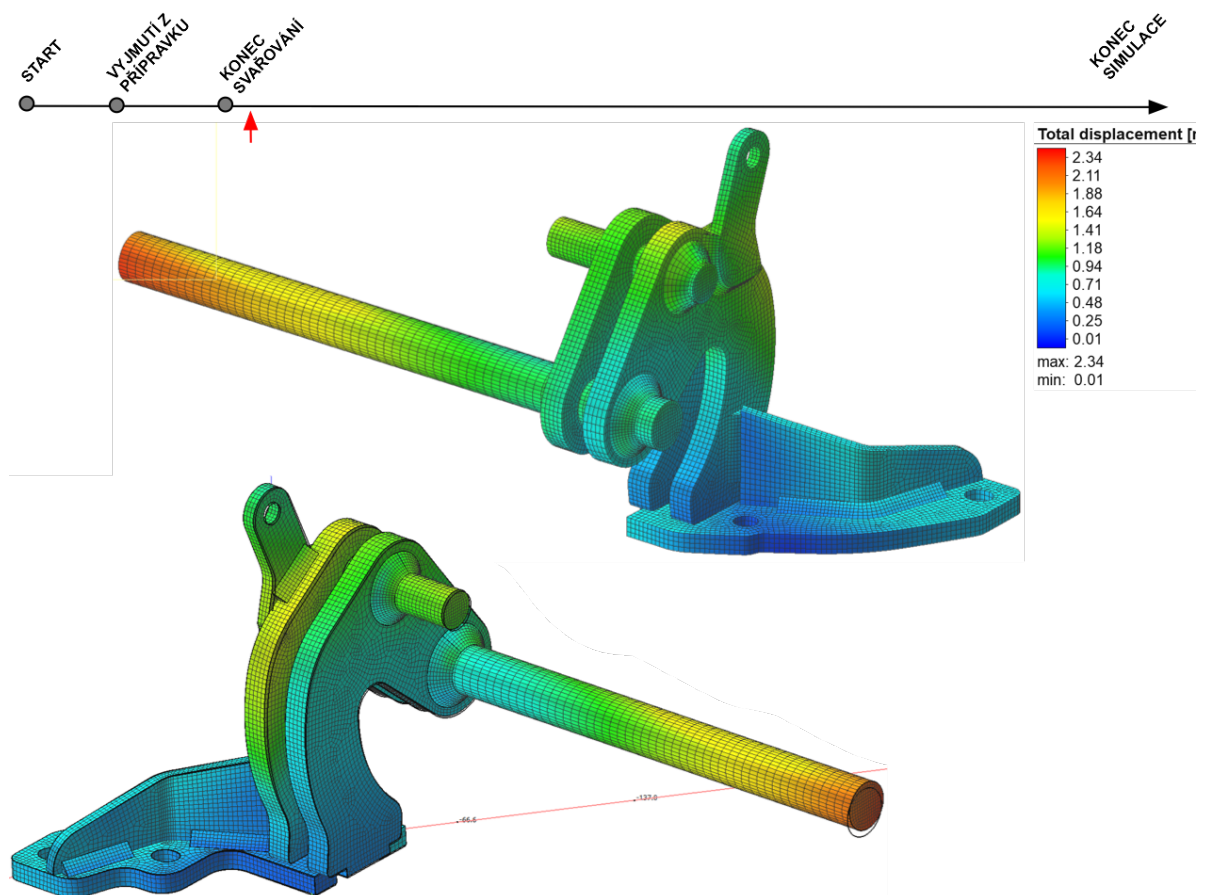
Obr. 55. Simulace procesu v čase 150s – vnitřní napětí



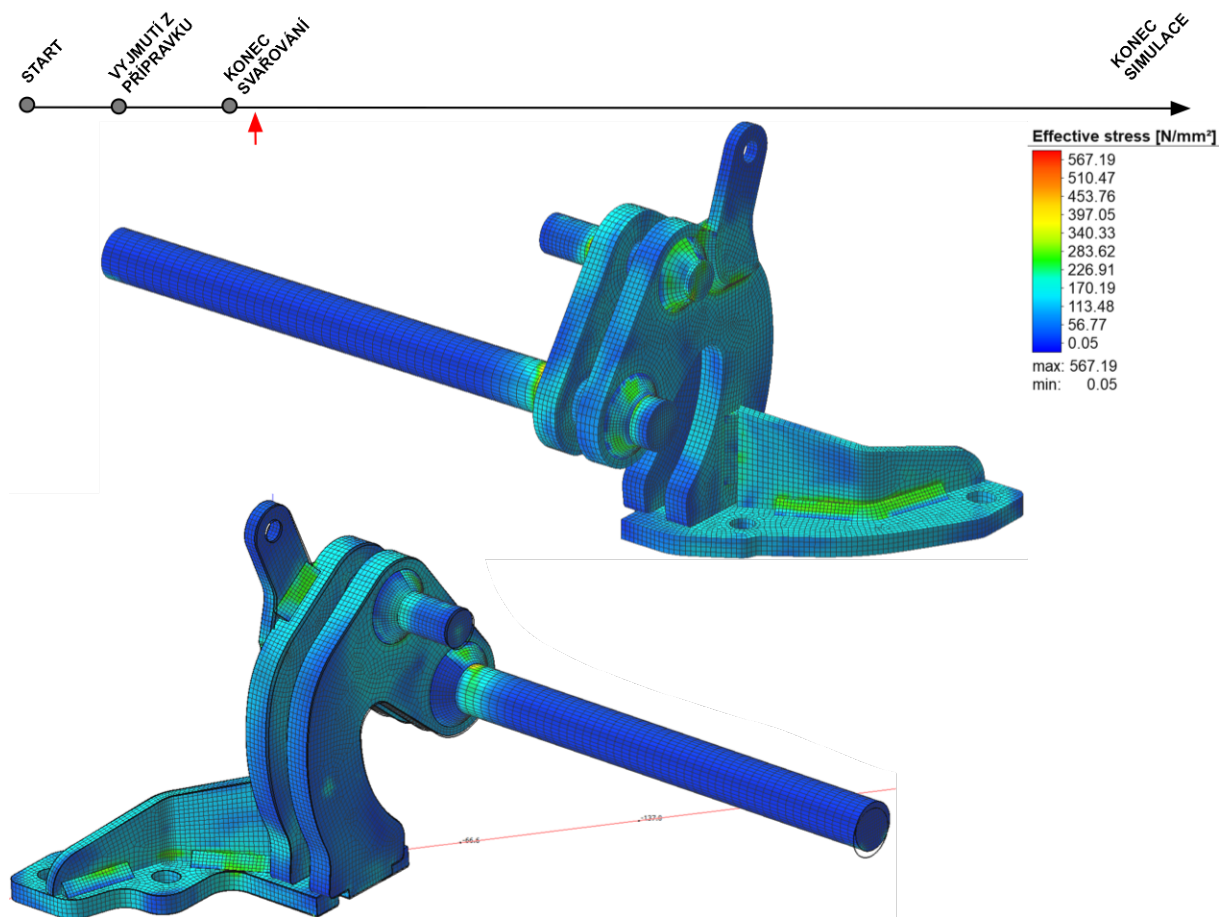
Obr. 56. Simulace procesu v čase 150s – fáze



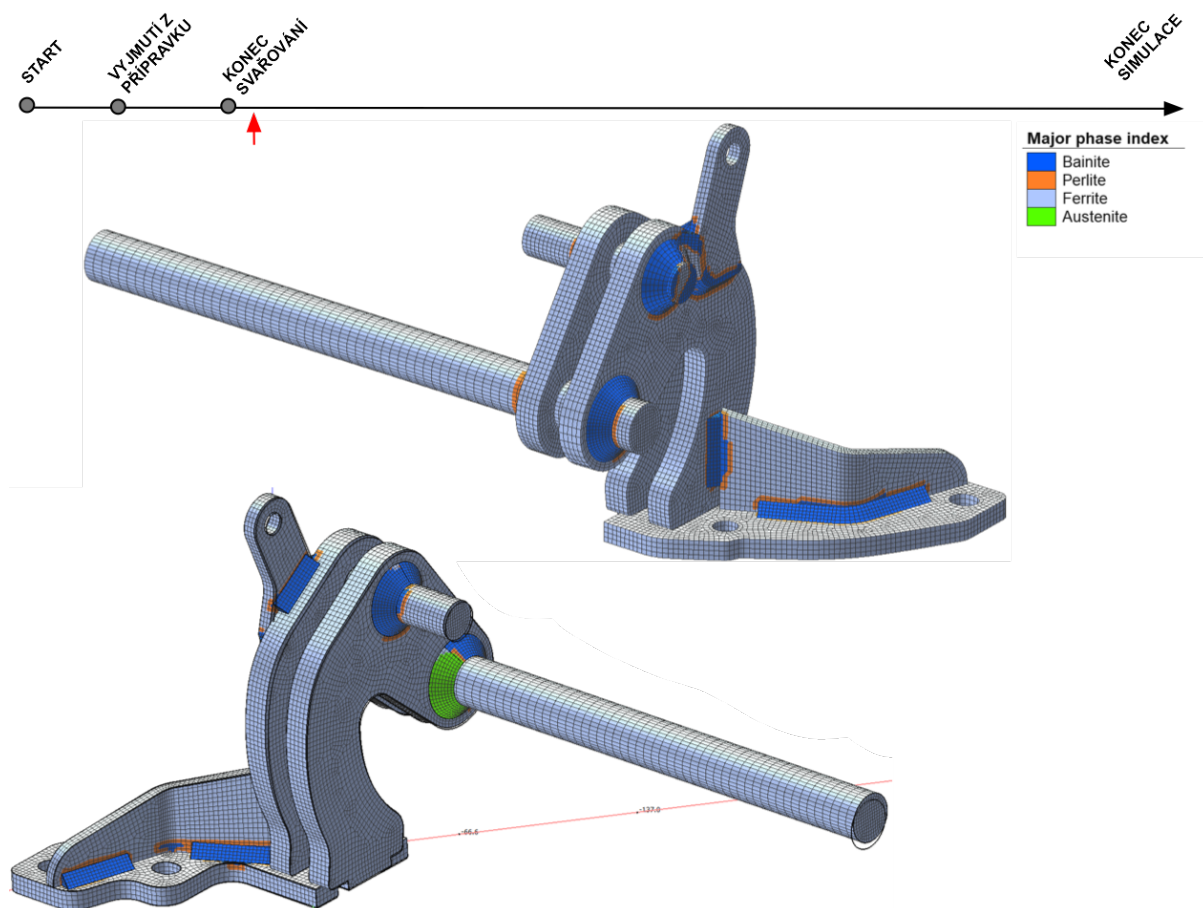
Obr. 57. Simulace procesu v čase 200s – teplota



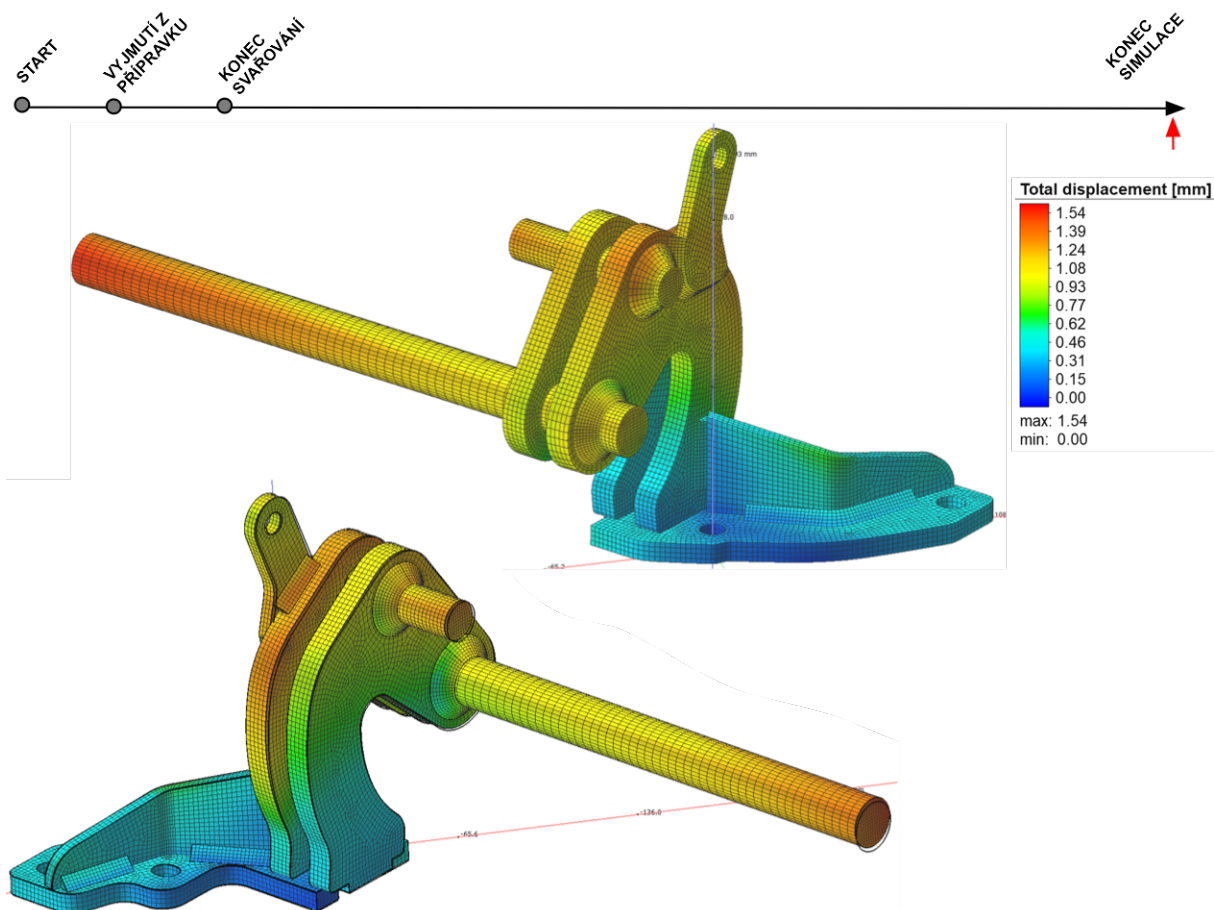
Obr. 58. Simulace procesu v čase 200s – deformace



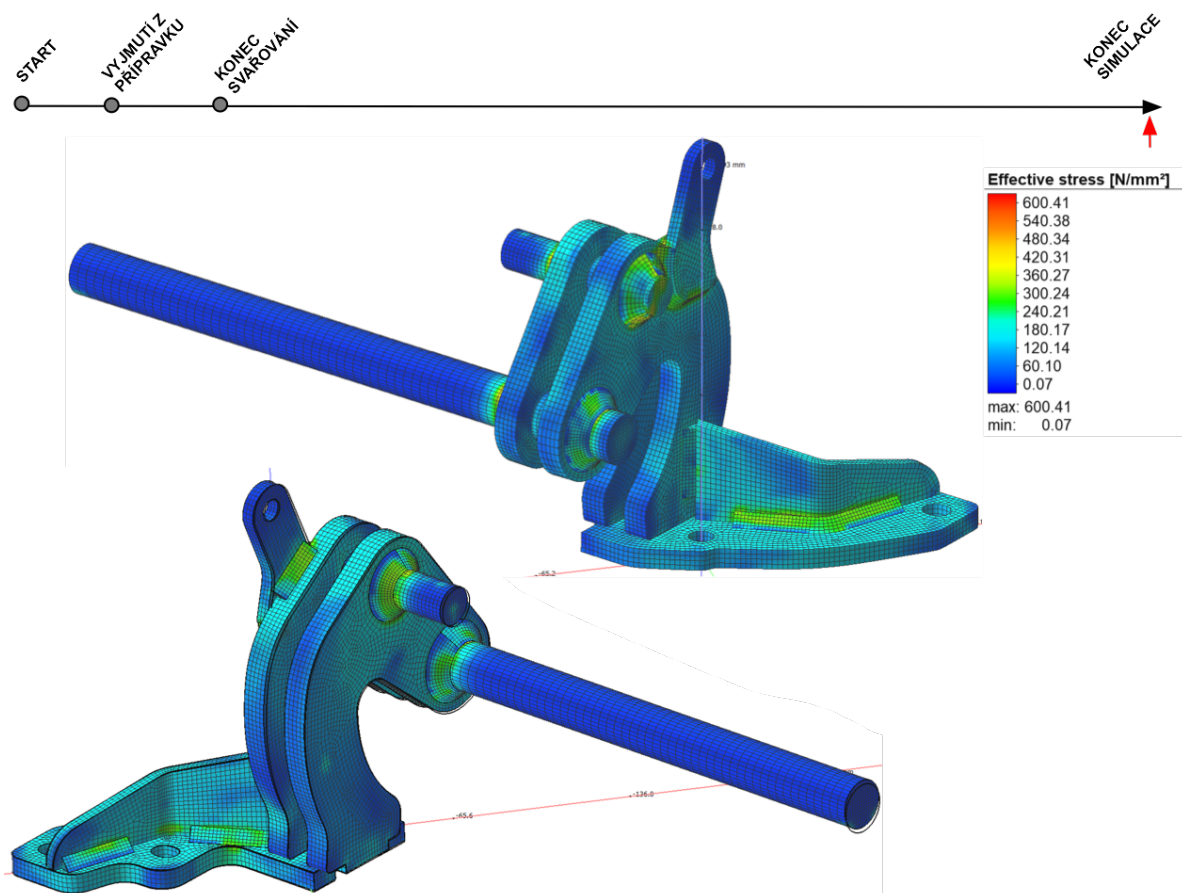
Obr. 59. Simulace procesu v čase 200s – vnitřní napětí



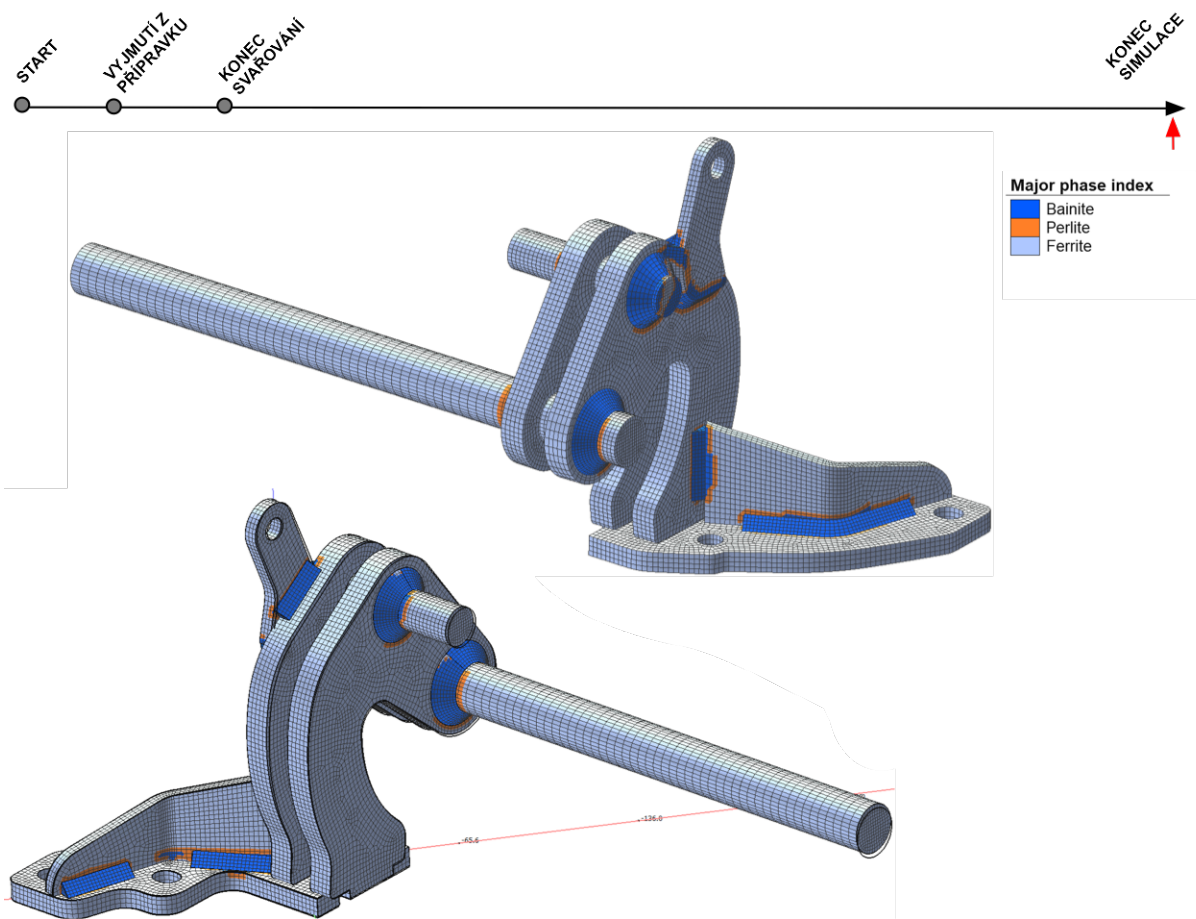
Obr. 60. Simulace procesu v čase 200s – fáze



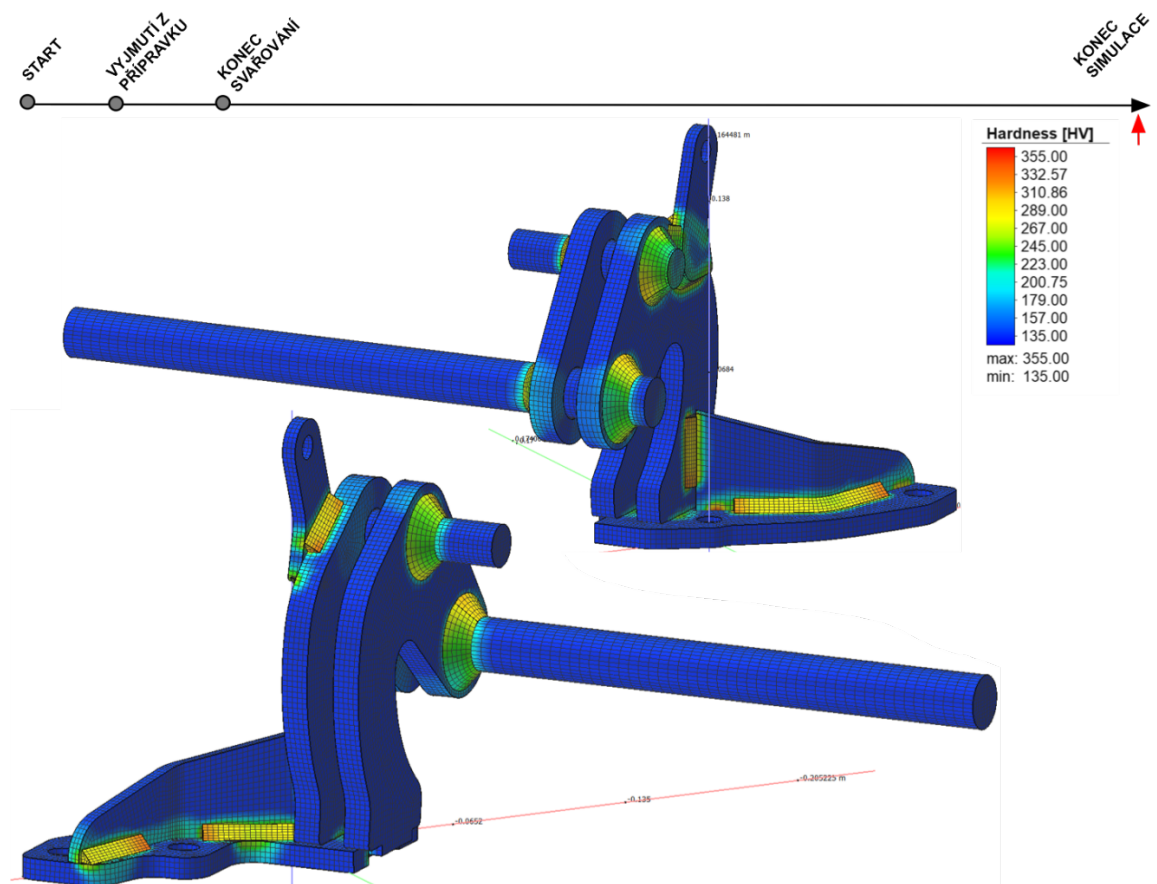
Obr. 61. Simulace procesu v čase 1300s – deformace



Obr. 62. Simulace procesu v čase 1300s – vnitřní napětí



Obr. 63. Simulace procesu v čase 1300s – fáze



Obr. 64. Simulace procesu v čase 1300s - tvrdost

8. ANALÝZA VÝSLEDKŮ A MĚŘENÍ

V programu Simufact.welding byly pro potřeby této práce zhodnoceny výsledky 5 simulací. Rozdíly mezi simulacemi byly v materiálu, v definování funkce jedné okrajové podmínky a v typu řešiče. Jak bylo zmíněno, materiál tyčí (1018 HR) není popsán v databázi programu, a proto došlo k jeho nahrazení vlastnostmi podobným materiálem S355. Simulace, jež v sobě nesou vlastnosti obou materiálů jsou označeny jako S1 a S2. Rozdíl mezi S1 a S2 činí v definici 8. okrajové podmínky a typu řešiče. Pro kvalitnější zhodnocení výsledků a porovnání jsou ještě zhotoveny další tři simulace pouze s jedním materiálem S3 a to ocelí S235, jež je použita na všechny pálené díly. Pro přehlednost jsou změny v simulacích vyobrazeny v Tab. 12.

Simulace	S1	S2	S3	S4	S5
Pin Hinge	S355	S355	S235	S235	S235
Stop RH Cover	S355	S355	S235	S235	S235
Rozpěra	Bearig	Clamping	Bearing	Clamping	Bearing
Řešič	Pardiso Direct Sparse	Multifrontal Sparse:	Pardiso Direct Sparse	Multifrontal Sparse:	Multifrontal Sparse:

Tab. 12. Odlišnosti jednotlivých simulací

8.1. MĚŘENÍ SVAŘENCE

Měření probíhalo ve společnosti Doosan Bobcat EMEA. Pro potřeby měření bylo použito měřicí rameno Cim core od firmy Hexagon metrology (Obr. 65). Měření bylo prováděno na 8 kusech specializovaným metrologem, u kterých je zaručená stejná výrobní technologie jako u simulace.



Obr. 65. Cim core měřicí rameno (vlevo) a detailní štítek měřícího zařízení (vpravo)

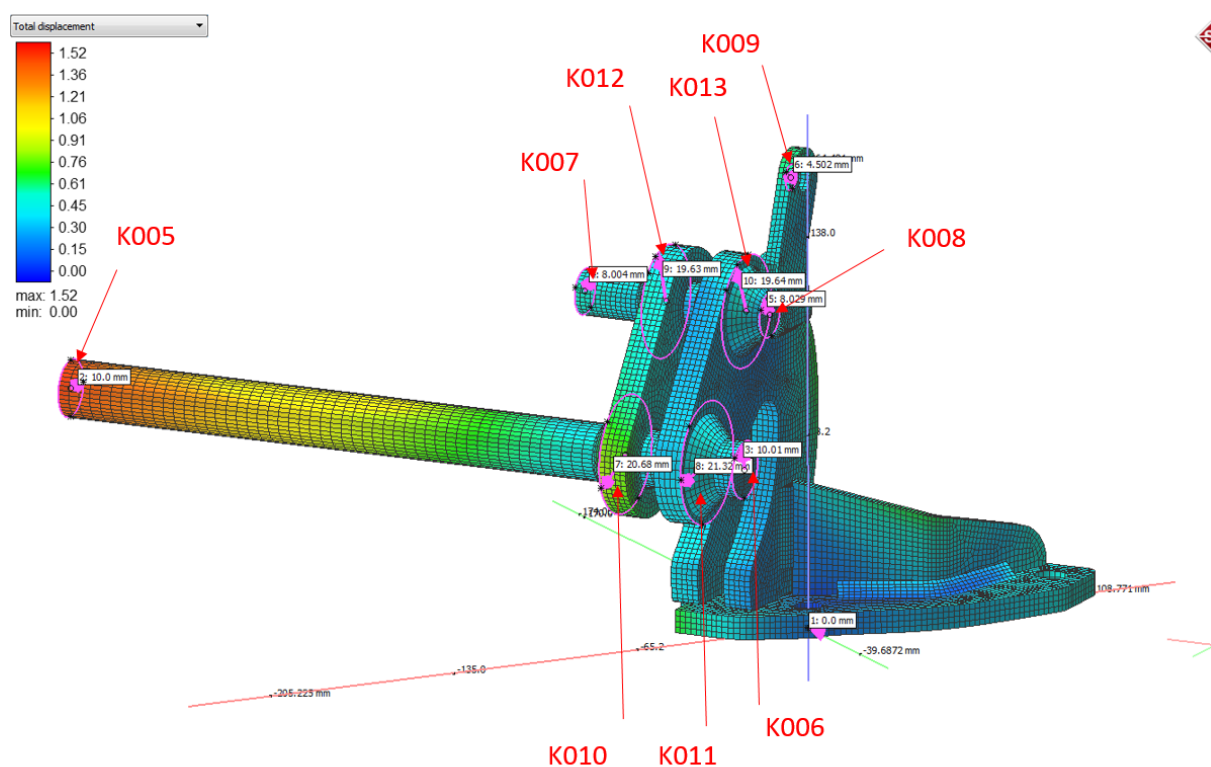
Měření probíhalo formou odečítání kartézských souřadnic měřeného prvku od lokálního souřadného systému. Princip spočívá v tom, že každý měřený prvek je střed vybrané kružnice na určitém místě svařence. Kružnice je v programu Simufact.welding získána definováním 3 bodů na kruhovém dílci (či dílci s rádiusem). Díky těmto třem bodům program vyhodnotí polohu středu kružnice vůči lokálnímu souřadnému systému. Obdobný princip je zachován při skutečném měření. Rozdílem je, že se kruhové prvky musejí promítnout na definovanou plochu (v případě Simufact.welding stačí jako určující body vzít prvky ležící na vyhodnocované ploše).

Postup měření

1. Definování měřených prvků,
2. upnutí svařence do magnetického přípravku,
3. vyrovnání měřeného dílce,
4. měření definovaných prvků.

Definování upnutých dílců

Definováno bylo celkem 9 bodů. Ke každému prvku je definována souřadnice. Přehled měřených prvků je zřejmý z Obr. 66.



Obr. 66. Definování měřených bodů

Upnutí svařence

Pro potřeby metrologie je svařenec upevněn v magnetickém přípravku dle Obr. 67.

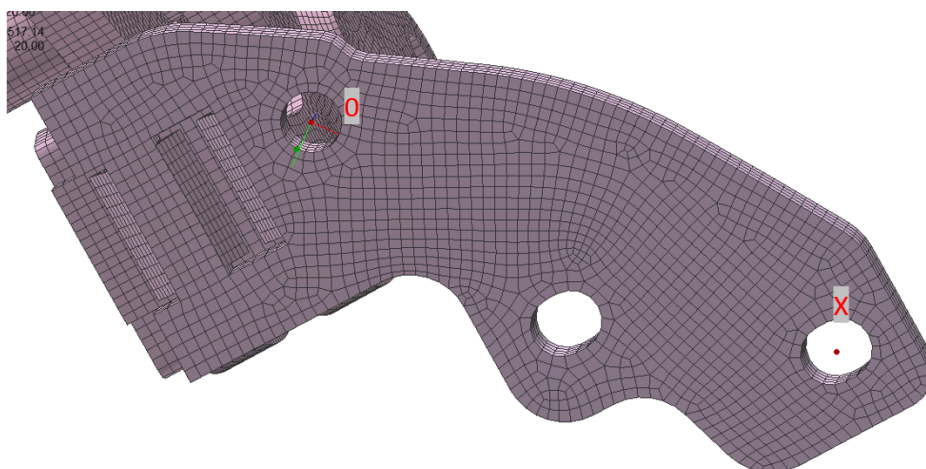


Obr. 67. Upnutí svařence na magnetický přípravek

Vyrovnění dílce

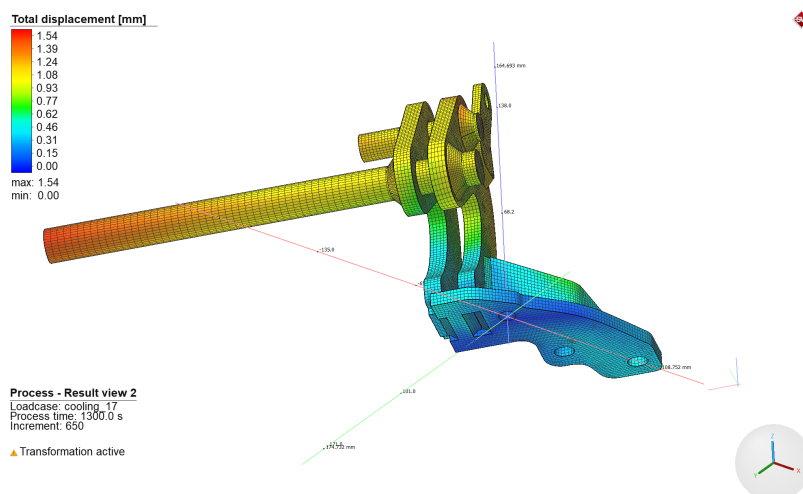
Pro vyrovnění svařence slouží spodní plocha (dílece plate hinge 2). Do této roviny je následně promítnuta kruhová díra (označení 0). Střed promítnuté kružnice slouží jako počátek souřadného systému. Osa X je pak definována jako střed, tzv. slotu (protáhlá kruhová díra – označení X). Po definování osy X následuje natočení osy Y, které se definuje již v softwaru, neboť se jedná pouze o natočení souřadného systému.

K vyrovnění v programu Simufact.welding slouží funkce transform location. Díky této funkci můžeme přesně definovat počátek lokálního souřadného systému. Vyrovnění bylo provedeno na již zdeformovaném dílci a to na stejném principu jako skutečný díl. Nejprve byly zjištěny souřadnice osy kruhové díry, které se dotýkají spodní hrany (dosažení promítnutí osy na spodní hranu). Nalezení spočívalo ve výpočtu středu protáhlé kruhové díry. Po definování směru počátku 0 a směru X viz Obr. 68 následovalo určení směru osy Y.



Obr. 68. Zobrazení prvků pro potřeby vyrovnění v simulačním softwaru

Již vyrovnanou součást zobrazuje Obr. 69.



Obr. 69. Vyrovnaná součást v simulačním softwaru

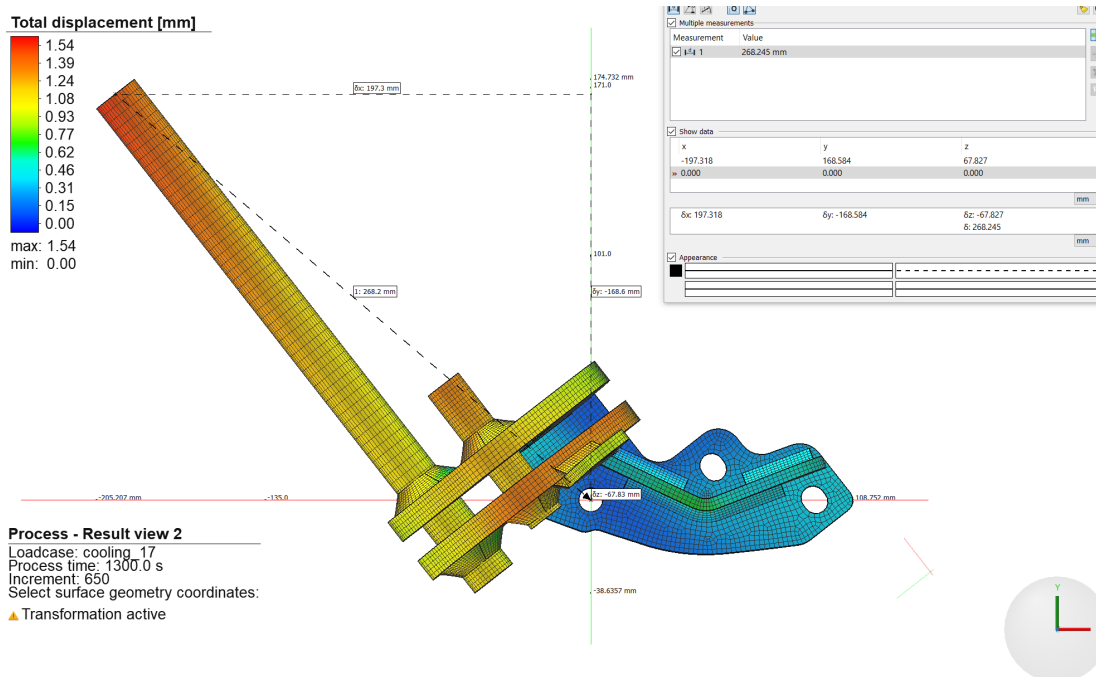
PRVEK	OSA	NOMINÁL	NOMINÁL SIMULACE	ROZDÍL
K005	X	-198,119	-198,119	0
	Y	167,214	167,214	0
	Z	68,250	68,25	0
K006	X	-41,089	-41,089	0
	Y	-33,701	-33,701	0
	Z	68,250	68,25	0
K007	X	-62,677	-62,677	0
	Y	45,885	45,885	0
	Z	115,250	115,25	0
K008	X	-19,571	-19,571	0
	Y	-9,268	-9,268	0
	Z	115,250	115,25	0
K009	X	3,546	3,546	0
	Y	20,223	20,223	0
	Z	154,209	154,209	0
K010	X	-68,796	-68,796	0
	Y	1,749	1,748	0
	Z	68,250	68,25	0
K011	X	-50,326	-50,327	0
	Y	-21,882	-21,883	0
	Z	68,250	68,25	0
K012	X	-43,570	-43,57	0
	Y	21,465	21,465	0
	Z	115,247	115,247	0
K013	X	-25,104	-25,104	0
	Y	-2,169	-2,169	0
	Z	115,250	115,25	0

Tab. 13. Výsledky kalibrace měření

Pro kalibraci měření slouží Tab. 13. Tím, že na počátku svařování jsou měřené prvky v absolutní shodě jak v simulačním, tak i měřícím programu. Můžeme přikročit k měření.

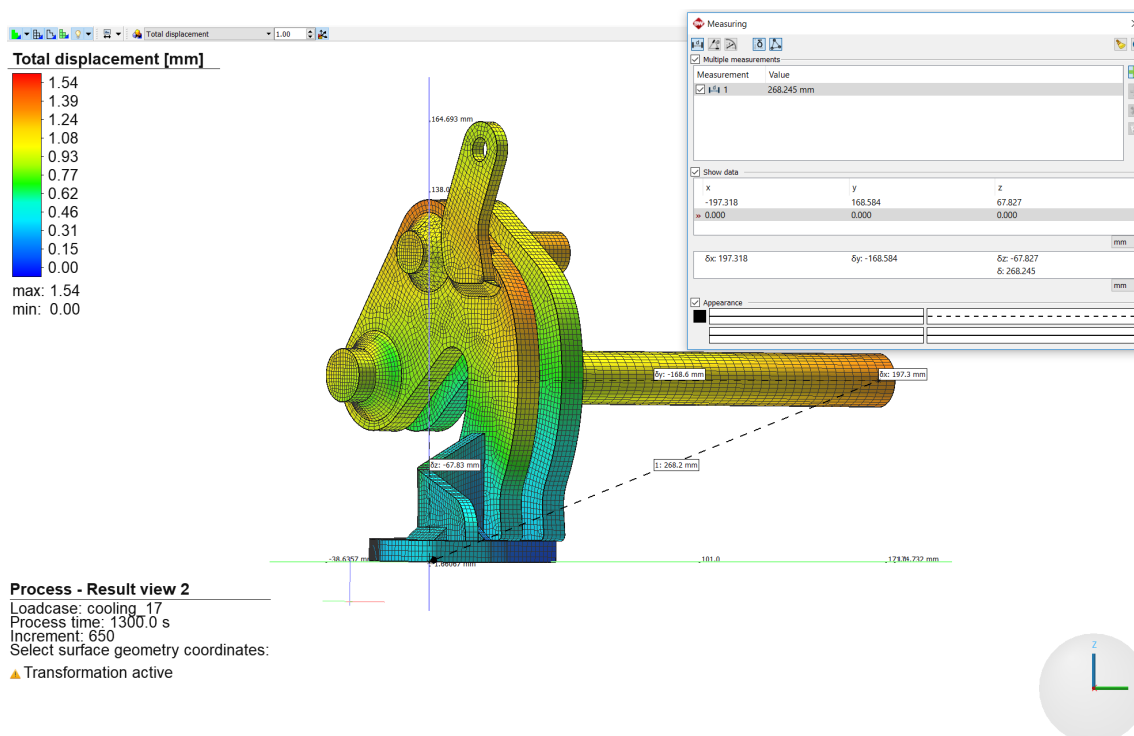
Měření prvků

Pro ukázkou je zvoleno měření prvku s označením K005 v programu Simufact.welding.



Obr. 70. Výsledek z měření prvku K005 simulace S1

Pro měření jsou využívány hodnoty os kartezského systému. Na Obr. 70 vidíme měřený bod (konec osy tyče). Z programu jsou zjištěny souřadnice X,Y a Z. V tomto případě činí hodnoty (X: -197,318 Y: +168,584 Z: 67,827). Hodnoty je nutné chápat ve smyslu kolik se musí přičíst od měřeného bodu (konec osy tyče), aby byl součet roven 0 (střed lokálního souřadného systému).



Obr. 71. Výsledky měření prvku K005 simulace S1

8.2. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V Tab. 14 jsou vyhodnocené souřadnice měřených prvků.

P	O	001	002	003	004	005	006	007	008	SM. ODCH	Ø
K005	X	-197,994	-198,202	-198,101	-197,308	-198,289	-197,562	-197,729	-197,951	0,314	-197,89
	Y	167,429	167,349	167,247	167,392	167,37	167,021	166,759	166,732	0,269	167,16
	Z	66,52	67,078	67,455	69,138	67,672	66,977	66,948	69,679	1,055	67,68
K006	X	-40,606	-40,446	-40,463	-40,432	-40,716	-40,04	-39,927	-40,332	0,250	-40,37
	Y	-33,128	-33,118	-33,149	-33,534	-33,06	-33,678	-33,749	-33,785	0,295	-33,40
	Z	68,526	68,609	68,373	68,261	68,647	68,762	68,803	68,005	0,253	68,50
K007	X	-61,446	-61,079	-61,173	-60,808	-61,273	-61,091	-61,108	-61,072	0,171	-61,13
	Y	45,728	45,663	45,234	44,7	45,398	45,603	45,549	44,202	0,504	45,26
	Z	114,834	115,056	115,153	115,795	115,156	114,986	114,971	115,771	0,342	115,22
K008	X	-18,501	-18,122	-18,072	-17,923	-18,484	-18,31	-18,267	-18,092	0,192	-18,22
	Y	-9,392	-9,469	-9,741	-10,553	-9,956	-9,74	-9,749	-10,949	0,504	-9,94
	Z	115,052	115,24	114,82	114,922	115,383	115,353	115,388	114,997	0,210	115,14
K009	X	3,433	4,203	4,152	4,845	3,854	4,103	4,1	4,207	0,368	4,11
	Y	21,31	21,01	20,282	19,392	20,265	20,388	20,407	18,587	0,809	20,21
	Z	153,601	153,605	153,59	153,965	153,901	153,846	153,872	154,202	0,201	153,82
K010	X	-68,359	-68,492	-68,41	-68,158	-68,668	-68,445	-68,251	-68,22	0,155	-68,38
	Y	2,257	2,374	2,301	1,81	2,249	2,209	1,869	1,643	0,255	2,09
	Z	68,47	68,638	68,445	68,506	68,338	68,583	68,419	68,291	0,109	68,46
K011	X	-50,102	-49,843	-49,865	-49,604	-50,011	-49,862	-49,752	-49,448	0,197	-49,81
	Y	-21,651	-21,712	-21,709	-22,061	-21,758	-21,603	-21,611	-22,342	0,244	-21,81
	Z	68,271	68,385	68,198	68,33	68,34	68,396	68,403	68,243	0,071	68,32
K012	X	-43,566	-43,18	-43,19	-42,674	-43,411	-43,18	-43,154	-42,823	0,269	-43,15
	Y	22,126	21,926	21,593	21,13	21,711	21,957	21,935	20,849	0,418	21,65
	Z	115,331	115,243	115,528	115,059	115,375	115,595	115,339	115,241	0,158	115,34
K013	X	-25,063	-24,496	-24,478	-24,292	-24,936	-24,8	-24,774	-24,265	0,278	-24,64
	Y	-1,72	-1,887	-2,21	-2,863	-2,287	-1,927	-1,93	-3,204	0,488	-2,25
	Z	115,019	114,968	114,998	115,183	115,475	115,293	115,371	115,471	0,197	115,22

Tab. 14. Naměřené hodnoty svařených dílců

Porovnání simulace S1 s výsledky měření

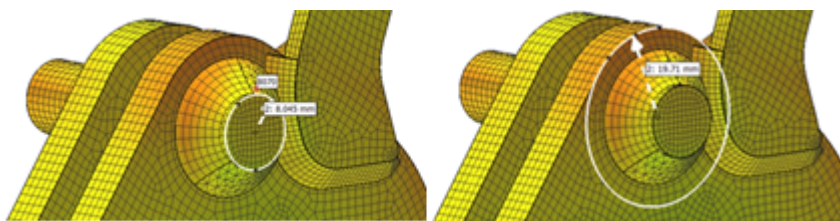
Prvek	OSA	SM. ODCH	Ø	S1	DEF. MER	DEF. SIM	ODCHYLKA
K005	X	0,314	-197,89	-197,321	-0,23	-0,798	0,57
	Y	0,269	167,16	168,582	0,05	-1,368	1,42
	Z	1,055	67,68	67,824	0,57	0,426	0,14
K006	X	0,250	-40,37	-40,354	-0,72	-0,735	0,02
	Y	0,295	-33,40	-32,462	-0,30	-1,239	0,94
	Z	0,253	68,50	69,788	-0,25	-1,538	1,29
K007	X	0,171	-61,13	-61,334	-1,55	-1,343	0,20
	Y	0,504	45,26	47,944	0,63	-2,059	2,68
	Z	0,342	115,22	115,44	0,03	-0,19	0,22
K008	X	0,192	-18,22	-18,494	-1,35	-1,077	0,27
	Y	0,504	-9,94	-7,222	0,68	-2,046	2,72
	Z	0,210	115,14	115,859	0,11	-0,609	0,71
K009	X	0,368	4,11	4,581	-0,57	-1,035	0,47
	Y	0,809	20,21	22,903	0,02	-2,68	2,70
	Z	0,201	153,82	154,068	0,39	0,141	0,25
K010	X	0,155	-68,38	-68,269	-0,42	-0,527	0,11
	Y	0,255	2,09	3,186	-0,34	-1,438	1,10
	Z	0,109	68,46	69,352	-0,21	-1,102	0,89
K011	X	0,197	-49,81	-49,427	-0,52	-0,9	0,38
	Y	0,244	-21,81	-20,645	-0,08	-1,238	1,16
	Z	0,071	68,32	69,657	-0,07	-1,407	1,34
K012	X	0,269	-43,15	-42,49	-0,42	-1,08	0,66
	Y	0,418	21,65	23,714	-0,19	-2,249	2,06
	Z	0,158	115,34	115,56	-0,09	-0,313	0,22
K013	X	0,278	-24,64	-23,904	-0,47	-1,2	0,73
	Y	0,488	-2,25	-0,18	0,08	-1,989	2,07
	Z	0,197	115,22	115,784	0,03	-0,534	0,56
Ø odchylka[mm]							0,89
Neshoda [%]							26

Tab. 15. Porovnání výsledků simulace S1 s náměry (hodnoty v mm)

Poznámka

Tabulka obsahuje sloupec s průměrnými hodnotami z měření spolu s jejich směrodatnou odchylkou. Sloupec S1 značí hodnoty z výsledku simulace. DEF. MER signalizuje odchylku měřeného dílce od nominální (původní) hodnoty před svařováním. V tomto případě značí deformaci vlivem svařování. Sloupec označen DEF. SIM značí odchylku od původního nominálního stavu před simulací a po ní. Díky těmto hodnotám v každém směru kartézského souřadného systému je možné odečíst směr deformace (kam o kolik se měřený prvek posunul vlivem napětí při svařování). Poslední sloupec nese odchylku naměřené deformace od měřeného skutečného dílce a simulace. Čím blíže je hodnota tohoto sloupce rovna nule, tím těsnější je shoda deformace skutečného dílce a simulace.

Simulace S1 jenž v sobě nese 2 druhy materiálů, rozpěru ve funkci bearing a nastavení solveru Pardiso Direct Sparse. Tato simulace neodpovídala měření v 7 případech (červená pole). V jednom případě (žlutá pole) není možné definovat chybu, neboť je hodnota simulace v mezích směrodatné odchylky, v ostatních případech se výsledky simulace shodují s měřením. Největší chybu simulace vykázala v oblasti měření prvku K008 a K013. Detail je zobrazen na Obr. 72.



Obr. 72. Prvek K008 (vlevo) a prvek K013 (vpravo)

Simulace dosáhla průměrné odchylky od průměrné hodnoty naměřených dílců 0,89 mm. Přičemž prvky, které se neshodovaly, dosáhly odchylky přesahující i 2 mm. Výpočet této simulace trval téměř 8 hodin. Tento výpočet byl v porovnání s ostatními rychlejší. Tato analýza příliš neodpovídá naměřeným výsledkům.

Porovnání simulace S2 s výsledky měření

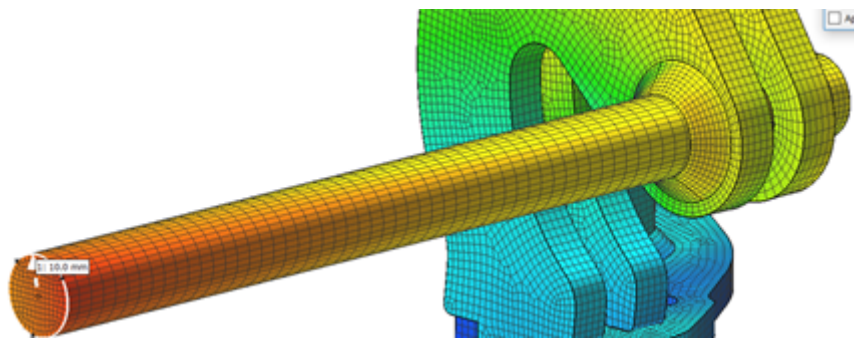
Prvek	OSA	SM. ODCH	Ø	S2	DEF. MER	DEF. SIM	ODCHYLKA
K005	X	0,314	-197,89	-197,486	-0,23	-0,63	0,41
	Y	0,269	167,16	167,527	0,05	-0,31	0,36
	Z	1,055	67,68	69,291	0,57	-1,04	1,61
K006	X	0,250	-40,37	-40,636	-0,72	-0,45	0,27
	Y	0,295	-33,40	-33,615	-0,30	-0,09	0,21
	Z	0,253	68,50	68,462	-0,25	-0,21	0,04
K007	X	0,171	-61,13	-61,813	-1,55	-0,86	0,68
	Y	0,504	45,26	45,965	0,63	-0,08	0,71
	Z	0,342	115,22	115,439	0,03	-0,19	0,22
K008	X	0,192	-18,22	-19,029	-1,35	-0,54	0,81
	Y	0,504	-9,94	-9,226	0,68	-0,04	0,72
	Z	0,210	115,14	115,07	0,11	0,18	0,07
K009	X	0,368	4,11	3,867	-0,57	-0,32	0,25
	Y	0,809	20,21	20,198	0,02	0,02	0,01
	Z	0,201	153,82	153,965	0,39	0,24	0,14
K010	X	0,155	-68,38	-68,52	-0,42	-0,28	0,14
	Y	0,255	2,09	2,065	-0,34	-0,32	0,02
	Z	0,109	68,46	68,512	-0,21	-0,26	0,05
K011	X	0,197	-49,81	-49,73	-0,52	-0,60	0,08
	Y	0,244	-21,81	-21,956	-0,08	0,07	0,15
	Z	0,071	68,32	68,41	-0,07	-0,16	0,09
K012	X	0,269	-43,15	-43,031	-0,42	-0,54	0,12
	Y	0,418	21,65	21,683	-0,19	-0,22	0,03
	Z	0,158	115,34	115,362	-0,09	-0,11	0,02
K013	X	0,278	-24,64	-24,406	-0,47	-0,70	0,23
	Y	0,488	-2,25	-2,186	0,08	0,02	0,07
	Z	0,197	115,22	115,091	0,03	0,16	0,13
Ø odchylka[mm]							0,26
Neshoda [%]							11

Tab. 16. Porovnání výsledků simulace S2 s náměry (hodnoty v mm)

Simulace S2, jež v sobě nese 2 druhy materiálů, rozpěru ve funkci clamping a nastavení řešiče Multifrontal Sparse.

Výsledky simulace S2 se ze všech nejvíce shodují s výsledky měření. Můžeme tedy říct, že toto nastavení nejlépe vystihuje skutečné svařování. Neshoda panuje pouze ve 3 měřených osách, přičemž směrodatná odchylka u prvku K005 v ose Z dosahuje přes 1 mm. Čili v tomto směru jsou výsledky měření značně rozptýlené. Ve třech případech jsou výsledky simulace a měření v rámci směrodatné odchylky a není možné tvrdit, že se jedná o špatné

určení deformace. Průměrná aritmetická odchylka měřených kusů a simulace činila pouhých 0,26 mm. Ukázkou neshodného prvku K005 zobrazuje Obr. 73.



Obr. 73. Neshodný prvek K005 v osách y a z

Výsledky této simulace považují za přesné. Nutné je zdůraznit, že vlivem změny solveru (Multifrontal Sparse) se výpočet protáhl na 15 hodin.

Porovnání simulace S3 s výsledky měření

Prvek	OSA	SM. ODCH	Ø	S3	DEF.MER	DEF. SIM	ODCHYLKA
K005	X	0,314	-197,89	-197,156	-0,23	-0,963	1,19
	Y	0,269	167,16	167,189	0,05	0,025	0,08
	Z	1,055	67,68	70,504	0,57	-2,254	1,69
K006	X	0,250	-40,37	-40,655	-0,72	-0,434	1,15
	Y	0,295	-33,40	-34,185	-0,30	0,484	0,18
	Z	0,253	68,50	68,198	-0,25	0,052	0,20
K007	X	0,171	-61,13	-61,761	-1,55	-0,916	2,46
	Y	0,504	45,26	45,054	0,63	0,831	1,46
	Z	0,342	115,22	115,742	0,03	-0,492	0,46
K008	X	0,192	-18,22	-18,915	-1,35	-0,656	2,01
	Y	0,504	-9,94	-10,164	0,68	0,896	1,57
	Z	0,210	115,14	115,032	0,11	0,218	0,32
K009	X	0,368	4,11	4,581	-0,57	-1,035	1,60
	Y	0,809	20,21	22,903	0,02	-2,68	2,66
	Z	0,201	153,82	154,171	0,39	0,038	0,42
K010	X	0,155	-68,38	-68,481	-0,42	-0,315	0,74
	Y	0,255	2,09	1,518	-0,34	0,23	0,11
	Z	0,109	68,46	68,534	-0,21	-0,284	0,50
K011	X	0,197	-49,81	-49,604	-0,52	-0,723	1,24
	Y	0,244	-21,81	-22,349	-0,08	0,466	0,39
	Z	0,071	68,32	68,9	-0,07	-0,65	0,72
K012	X	0,269	-43,15	-43,028	-0,42	-0,542	0,96
	Y	0,418	21,65	20,76	-0,19	0,705	0,52
	Z	0,158	115,34	115,531	-0,09	-0,284	0,38
K013	X	0,278	-24,64	-24,343	-0,47	-0,761	1,23
	Y	0,488	-2,25	-3,12	0,08	0,951	1,04
	Z	0,197	115,22	114,897	0,03	0,353	0,38
mm					Ø odchylka[mm]		0,95
					Neshoda [%]		19

Tab. 17. Porovnání výsledků simulace S3 s náměry (hodnoty v mm)

Simulace S3 je definována pouze jedním materiálem S235, rozpěrou ve funkci bearing a řešič Paradiso Direct Sparse. V porovnání se simulací S1 je rozdíl pouze v definování materiálu dílců. Simulace S3 (s materiálem S235) vykazuje menší počet neshod oproti S1. Nicméně má horší průměrnou přesnost než simulace S1, o téměř 0,5 mm. Simulace S3 obsahuje 3 oblasti (žlutá pole) měření, ve kterých je chyba v rámci směrodatné odchylky. Co se týká určení směru deformace (zelená pole) jsou simulace S1 a S3 stejné.

Porovnání simulace S4 s výsledky měření

Prvek	OSA	SM. ODCH	Ø	S4	DEF.MER	DEF. SIM	ODCHYLKA
K005	X	0,314	-197,89	-197,322	-0,23	-0,797	0,57
	Y	0,269	167,16	167,928	0,05	-0,714	0,77
	Z	1,055	67,68	68,965	0,57	-0,715	1,28
K006	X	0,250	-40,37	-40,851	-0,72	-0,238	0,48
	Y	0,295	-33,40	-33,528	-0,30	-0,173	0,13
	Z	0,253	68,50	68,371	-0,25	-0,121	0,13
K007	X	0,171	-61,13	-61,979	-1,55	-0,698	0,85
	Y	0,504	45,26	46,07	0,63	-0,185	0,81
	Z	0,342	115,22	115,335	0,03	-0,085	0,12
K008	X	0,192	-18,22	-19,168	-1,35	-0,403	0,95
	Y	0,504	-9,94	-9,195	0,68	-0,073	0,75
	Z	0,210	115,14	114,983	0,11	0,267	0,16
K009	X	0,368	4,11	3,675	-0,57	-0,129	0,44
	Y	0,809	20,21	20,15	0,02	0,073	0,06
	Z	0,201	153,82	153,935	0,39	0,274	0,11
K010	X	0,155	-68,38	-68,542	-0,42	-0,254	0,17
	Y	0,255	2,09	2,259	-0,34	-0,511	0,17
	Z	0,109	68,46	68,822	-0,21	-0,572	0,36
K011	X	0,197	-49,81	-49,194	-0,52	-1,133	0,62
	Y	0,244	-21,81	-21,297	-0,08	-0,586	0,51
	Z	0,071	68,32	69,038	-0,07	-0,788	0,72
K012	X	0,269	-43,15	-43,258	-0,42	-0,312	0,11
	Y	0,418	21,65	21,805	-0,19	-0,34	0,15
	Z	0,158	115,34	115,292	-0,09	-0,045	0,05
K013	X	0,278	-24,64	-24,577	-0,47	-0,527	0,06
	Y	0,488	-2,25	-2,232	0,08	0,063	0,02
	Z	0,197	115,22	115,119	0,03	0,131	0,10
Ø odchylka[mm]							0,39
Neshoda [%]							15

Tab. 18. Porovnání výsledků simulace S4 s náměry (hodnoty v mm)

Simulace S4 je definována pouze jedním materiálem S235, rozpěrou ve funkci clamping a řešičem Multifrontal Sparse. Rozdíl mezi simulacemi S2 a S4 je tedy pouze v definování materiálu. U této simulace je zřejmý nárůst nepřesností, neshoda dosahuje 15% a průměrná odchylka činí 0,39 mm. Potvrzuje tak skutečnost, že se zhoršenými vstupními daty, co se materiálu týče, dosáhneme horších výsledků. Nicméně je nutné říci, že se jedná o druhou nejpřesnější analýzu. Tato simulace předčila výsledky i simulaci S1. Z tohoto poznatku je možné odvodit „důležitost“ jednotlivých vstupních dat. Okrajové podmínky spolu se změnou řešiče (solveru) mají větší vliv na přesnost výpočtu než přesnost materiálu.

Porovnání simulace S5 s výsledky měření

Simulace s tímto nastavením nebyla dokončena. Software hlásil výstupní chybu 3015. V tomto případě se jednalo o vypočtení extrémně vysoké reakční síly v oblasti svaru kolem čepu. Tato chyba je způsobena velmi zdeformovanými prvky (svaření v místech blízkých již hotovému svaru).

Řešení

- Přesítovat model v místě problematického elementu
- Snížit spodní hranici časového kroku
- Zkontrolovat definici materiálu s fázovými přeměnami

Výsledná tabulka s obecným přehledem

Simulace	S1	S2	S3	S4	S5
Pin Hinge	S355	S355	S235	S235	S235
Stop RH Cover	S355	S355	S235	S235	S235
Rozpěra	Bearig	Clamping	Bearing	Clamping	Bearing
Řešič	Pardiso Direct Sparse	Multifrontal Sparse:	Pardiso Direct Sparse	Multifrontal Sparse:	Multifrontal Sparse:
Nepřesnost [%]	26	11	19	15	-
Ø odchylka[mm]	0,96	0,26	0,95	0,39	-

Tab. 19. Výsledná tabulka s obecným přehledem

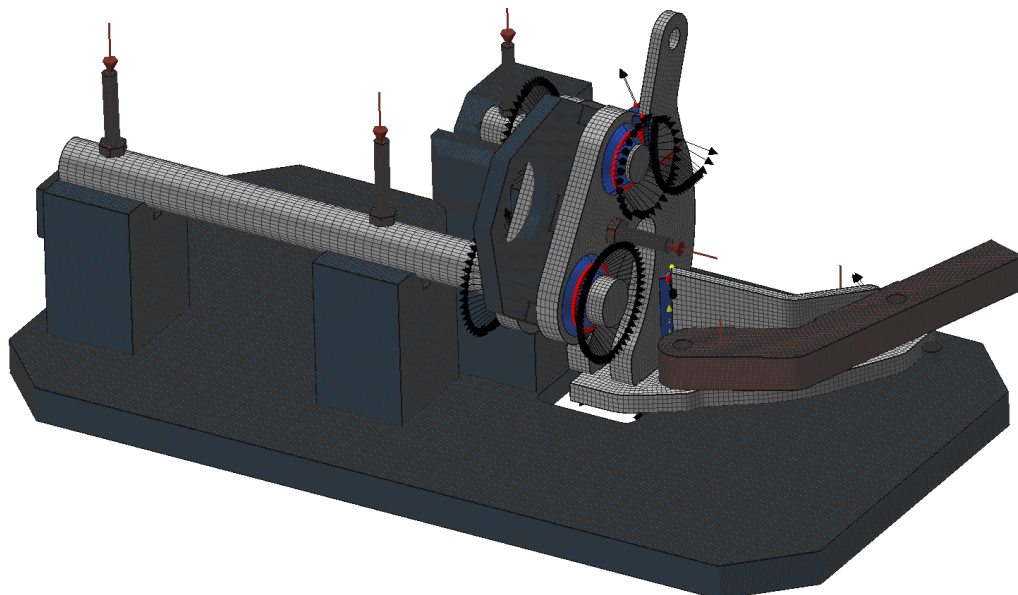
9. PROBLÉMY PŘI SIMULACI

Během vypracovávání simulace docházelo k několika selhání výpočtu, kvůli kterým se musel celý proces přepracovávat.

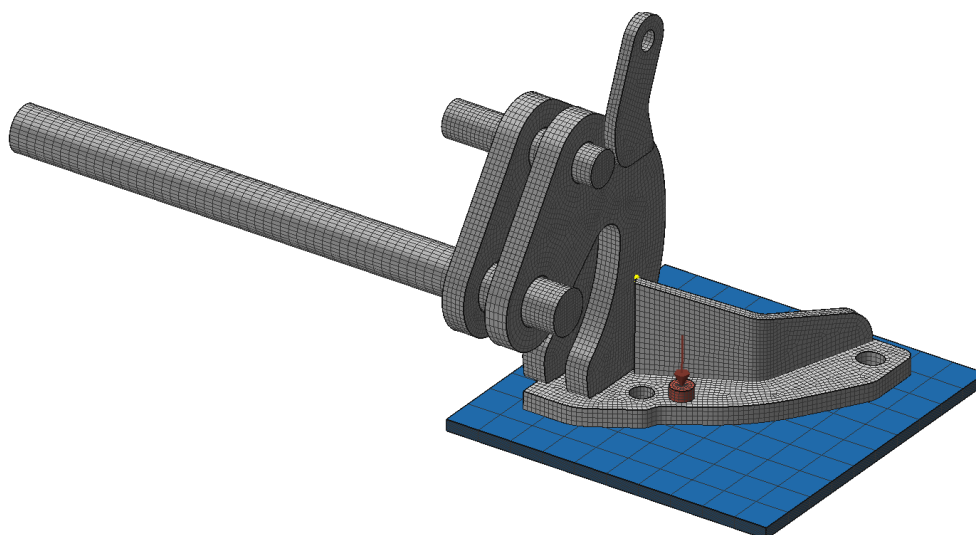
1. Nejprve se jednalo o problém při průniku svarů se základním tělesem. Tento problém se řešil hned při prvním spuštění analýzy. V procesu simulace byly z počátku nastaveny dva procesy nejprve svařování s upínkami a další proces svařování bez upínek. Smyslem pro rozdělení byla skutečnost, že sestava se nejdříve svaří v přípravku a po vyjmutí je svařen „na stole“ tedy bez vnějších upínacích sil.

Simulační program s více procesy funguje tak, že po první fázi se do nového procesu nahrávají již zdeformované geometrie (sítě) a právě tyto deformované sítě způsobily průniky sítí v oblasti ještě nesimulovaných svarů. Tento problém byl odstraněn tím, že se oba procesy spojily.

Definování okrajových podmínek v rámci svařování v přípravku a mimo přípravek bylo zhotoveno dle obrázku



Obr. 74. Ukázka okrajových podmínek při svařování v přípravku



Obr. 75. Ukázka řešení okrajových podmínek při svařování "na stole"

Spodní modrá deska (Obr. 75) značí okrajovou podmínku typu bearing a červený válec se šipkou, jenž udává směr působení síly, typu clamping. Síla je stanovena na 100 N. V reálném svařovacím procesu je přípravek vždy natočen tak, aby pro každý svar měl svářeč co nejlepší pracovní pozici. Touto formou došlo k zásadnímu ulehčení definování úlohy.

Bohužel není možné v programu Simufact.welding definovat počátek upnutí upínky a clampingu, lze pouze deaktivovat v určitém čase. Tato deska a virtuální upínka, působící silou 100 N, je aktivní během celého procesu svařování. Toto usnadnění s sebou nese možné ovlivnění výsledků.

2. Dalším častým důvodem selhání výpočtu bylo nekonvergování výpočtu. Po několika testovacích verzích bylo odvozeno, že vhodná hodnota kontaktní tolerance činí 0,08 mm (viz Tab. 11). Zásahy bylo třeba udělat v oblasti Convergence test base on. Toto kritérium udává, dle jakých podmínek dojde ke konvergenci výpočtu.

3. Původním plánem bylo vytvořit numerické simulace svařování na velkém svařovacím celku. Tím měla být radlice rypadla zřejmá z Obr. 12. Model obsahoval celkem 400 000 elementů a přes 80 větších či menších svarů. Radlice je svařována dvěma roboty, což je ideální varianta pro numerické simulace, protože není zanesen lidský faktor. Bohužel takto velký model nebylo možné relevantně simulovat transienční metodou. Simulace skončila na 8. svaru. Solver Mark přestal počítat z důvodu příliš velkých nároků na paměť RAM.

ZÁVĚR

Při práci se simulačním softwarem je kladen vysoký důraz na správnost vstupních dat a kvalitu (délku) výpočtu. Samotný zájem o takto podrobná data, která jsou potřeba k plnému definování simulace, vyřeší mnoho problémů, se kterými se potýkají společnosti, jenž pracují v oblasti technologie svařování. Příkladem může být ruční dovaření dílce po vyjmutí z robotického svařování, pokud není přesně definovaný postup, či není přesně plněn, dochází k možnosti variability výrobního procesu, která s sebou v drtivé většině nese zhoršení kvality výroby.

Numerické simulace svařování využívající transienční metodu vyžadují přesně stanovený výrobní postup. Pokud je tato podmínka dodržena i na pracovišti, pak výsledek simulace ve vysoké míře odpovídá realitě. V této práci je simulován a měřen dílec, jenž je vyráběn ručním svařováním metodou MAG. Tato skutečnost sebou vnáší mnoho proměnných, a zejména u ručního svařování platí vysoká variabilita výsledků od jednoho či druhého svařeče. Pokud se zaručí přesné dodržení předepsaných svařovacích parametrů (svařovacích rychlost), či velikost svarů) můžou simulace přesně předpovídat výslednou deformaci i u tak variabilního procesu jako je ruční svařování. Obecně jsou numerické simulace vhodnější pro práci svařovacích robotů, nedochází u nich k variabilitě pracovního procesu v takové míře jako u ručního svařování.

V případě simulace S2, jejíž nepřesnost je 11%, můžeme konstatovat, že simulace splnila svůj účel. Cílem bylo ověřit simulační software Simufact.welding na reálném dílci. Zhruba 10% nepřesnost výpočtu je již zanesena v samotném výpočetním řešiči a to kvůli únosné době výpočtu.

Co zatím může brzdit masový rozvoj simulace svařování je nízká materiálová základna. S tímto problémem se potýkám i v této práci. Ocel A574-1018HR byla nahrazena pouze podobnou ocelí S355, to samo o sobě do simulace vnáší řadu nepřesností a zřejmě to je na výsledcích přesnosti simulace S1 a S3. Simulace S3, jež obsahuje pouze jeden základní materiál, s sebou nese výrazné zhoršení přesnosti výsledků oproti simulace S1 (téměř 100%).

Z výsledků je zjevné, že největší vliv na přesnost výpočtu je doba výpočtu a určení okrajových podmínek. Vidíme, že v případě použití přípravku č. 8 (rozpěra) jako bearing

došlo ke značnému zhoršení výsledků, oproti clamping. To signalizuje důraz na přesné definování a pochopení funkce okrajových podmínek. V případě definování řešiče je důležité si uvědomit, co od výsledků očekáváme. Platí zde přímá úměra mezi výpočetním časem a přesností výsledků. Téměř jednou tak dlouhý výpočet (8 hodin → 15 hodin) s sebou nese zpřesnění výsledků.

Výsledky simulace jsou pro společnost Doosan Bobcat přijatelné, nicméně je kladen důraz na větší svařované celky (např. nedokončená simulace radlice). Simulace takto velkých svařenců, již není možná přesnou transienční metodou. Program simufact welding nabízí možnost řešit tuto problematiku využitím teplotního cyklu na místo pohybujícího se tepelného zdroje. Nevýhodou transienční metody je, že se teplo musí počítat pro každý element, jenž leží v trajektorii svaru. To s sebou nese vysoké nároky na dobu výpočtu. Příkladem může být, že výpočet 50 m svaru by transienční metodou trval týden. Bežné svařence, pro něž je plánované využití těchto simulací, mají i 10 m svaru. S ohledem na rychlost výpočtu není tato metoda pro podnik vhodná. Využitím teplotního cyklu se výrazně zkrátí doba výpočtu, protože teplo je vneseno na základě předdefinového grafu na celou délku svarové housenky. Tímto způsobem se vypočítají lokální účinky tepla v průběhu času a jejich důsledky pro celkovou strukturu (meta-transienční metoda, nebo-li MBD metoda). Největší urychlení výpočtu sledujeme u dlouhých svarů, menší pak u kratších. [23]

Program Simufact.welding je do značné míry intuitivní, nicméně bez podrobných znalostí jednotlivých funkcí není téměř možné dojít ke kvalitním výsledkům.

Pokud jsme schopni zjistit a pochopit práci a důležitost jednotlivých vstupních dat, jsme schopni pravdivě simulovat realitu a dosáhnout tolik kýžených finančních úspor při vývoji nového produktu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] O společnosti Bobcat CZ. <https://www.bobcat.cz> [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <https://www.bobcat.cz/o-spolecnosti-bobcat-cz>
- [2] SOBEK, Jakub. Optimalizace výrobního procesu výložníku E26. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
- [3] LANGR, Marek. Svařování a jeho modelování v simulačním softwaru. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Petr Vondrouš, Ph.D., IWE.
- [4] DOHNAL, Ivo. Numerická simulace svařování lopatky a rotoru turbíny. Brno, 2010. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.
- [5] SLOVÁČEK, Marek. NUMERICKÉ SIMULACE SVAŘOVÁNÍ VÝPOČET A HODNOCENÍ DISTORZÍ A ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ. Brno, 2005. Disertační práce. UNIVERZITA OBRANY BRNO. Vedoucí práce Prof. Ing. Vlastimil Křupka DrSc.
- [6] FRANCIS, Justin D. Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis. Virginia: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002
- [7] VLČEK, Libor, Vladimír DIVIŠ a Milan JARÝ. Predikce distorzí tlustostěnných svařovaných konstrukcí. Konstrukce [online]. 30.10.2009 [cit. 2018-07-11]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/predikce-distorzi-tlustostennyh-svarovanych-konstrukci/>
- [8] Prezentácia metód tavného zvarania: Program SYSWELD. , 48.
- [9] LANGR, Marek a Petr VONDORUŠ. Vlastnosti materiálů jako vstupní data pro simulaci svařování. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2017. ISBN ISBN 978-80-01- 06143-5.
- [10] PROCHÁZKA, Karel. Jak na metodu konečných prvků [online]. Opava, s. 20 [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: www.sspu-opava.cz/~prochazka/ruzne/MKP.doc
- [11] BROŽOVSKÝ, Jiří a Petr KONEČNÝ. Metoda konečných prvků ve stavební mechanice: Pomůcka pro stavební inženýry [online]. , 209 [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecnych_prvku_stavebni_mechanika_interaktivne.pdf
- [12] SLOVÁČEK, Marek, Josef TEJC a Mojmír VANĚK. Numerické řešení procesu svařování a tepelného zpracování pro Cr-Mo-Ni-V oceli (typ Z): Technologická agentura České republiky, projekt TA02010992. Plzeň, 2014.
- [13] KHAZAN, Pavel. Structural welding simulation with Simufact.welding: Basics of structural welding simulation. In: . Hamburk, 2016, s. 73.
- [14] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Infosheet Boundary conditions clampings. Hamburk.

- [15] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Infosheet Boundary conditions bearings. Hamburk.
- [16] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Infosheet Boundary conditions local joints. Hamburk.
- [17] Metal Suppliers Online: 1018 carbon steels material property data sheet - product availability and request a quote [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <http://www.suppliersonline.com/propertypages/1018.asp>
- [18] AZO materials: AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6115>
- [19] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Infosheet Heat source. Hamburk.
- [20] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Material data. Hamburk.
- [21] SEDLÁČEK, Alexander. Optimalizace procesu svařování násady a výložníku zemního rypadla. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT fakulta strojní. Vedoucí práce Prof. Ing. Suchánek, CSc.
- [22] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Parallelization. Hamburk.
- [23] MSC.SOFTWARE a SIMUFACT.WELDING. Thermal Cycle. Hamburk.
- [24] *Moderní trendy ve svařování MAG: Hotel Petr Bezruč, Malenovice : 4.-5. října 2001 : [sborník přednášek]*. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2001. ISBN 80-85988-66-6.
- [25] ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000. ISBN 80-88780-36-5.