

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T013 Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akademický rok 20011/20012

Bc. Ondřej Baroch

zadani

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval zcela samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Baroch	Jméno Ondřej	
STUDIJNÍ OBOR	Katedra materiálu a strojírenské metalurgie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Mentl, CSc.	Jméno Václav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ		
NÁZEV PRÁCE	Stanovení vlivu sálání pecní vyzdívky na vsázku ingotů pomocí CAE		

FAKULTA	strojí	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------------	----------------	------------	--------------------	-------------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	53	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	13
---------------	-----------	---------------------	-----------	----------------------	-----------

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato práce se zabývá vlivem sálání pecní vyzdívky na vsázku ingotů a možným vznikem podélných trhlin během ohřevu ingotu z materiálu 34CrNiMo6 v peci, které mohou vznikat v počátcích ohřevu. Hlavním cílem bylo především zpřesnit již realizované simulace, a to pomocí rozložení vsázky ingotů, zpřesněných materiálových dat a teplotním polem v ingotu.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Vznik trhlin, vliv sálání v peci, vsázka ingotů, teplotní pole, napěťové pole, zpřesněná materiálová data, reálné podmínky, FEM model

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Baroch	Name Ondřej
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Mentl,CSc.	Name Václav
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	
TITLE OF THE WORK	Analysis of the influence of radiation furnace linings batch of ingots using CAE	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2012
----------------	-----------------------------------	-------------------	------------	---------------------	-------------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	53	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	13
----------------	-----------	------------------	-----------	-----------------------	-----------

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The purpose of this diploma thesis is to analyse the influence of radiation in furnace on variors ingots and possible formation of longitudinal surface cracks in a work load of diverse ingots. The cracks probably form within a few minutes of charging due to the temperature gradient that has the most severe impact on the ingot surface. A numerical model was created to analyse the behaviour of a work load of diverse ingots in a furnace. The selected ingots that were part of the observation were selected by statistical analysis. Ingots cast from 34CrNiMo6 steel were used for the simulation.</p>
KEY WORDS	<p>Ingots cracking, work load of disparate ingots, radiation in furnace, FEM model, temperature field, more accurate material data, real coditions</p>

Poděkování

Tímto bych chtěl velice poděkovat Ing. Filipu Tikalovi, Ph.D. za jeho odborné vedení při vypracování mé diplomové práce. Můj velký dík patří také odborníkům ze společnosti COMTES FHT a.s a Pilsen Steel s.r.o. za jejich spolupráci při řešení praktické části. Dále bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Václavu Mentlovi, CSc. a Doc. Ing. Vladimíru Bernáškovi, CSc. za odborné připomínky k diplomové práci. Děkuji rovněž svým rodičům za jejich všestrannou podporu během mého studia a samozřejmě všem dalším, kteří mi během studia pomáhali.

Obsah:

OBSAH:	1
ÚVOD:	3
POUŽITÁ OZNAČENÍ A SYMBOLY:	4
1. PROBLEMATIKA OHŘEVU INGOTŮ – FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ POVRCHOVOU KVALITU OHŘÍVANÝCH INGOTŮ	5
1.1 Teorie přestupu (sdílení) tepla	5
1.1.1 Obecná teorie přestupu tepla	5
1.1.2 Přestup tepla v pecním prostředí	8
1.2 Vliv teploty na vlastnosti materiálu	10
1.2.1 Fyzikální vlastnosti ohřivaného materiálu	10
1.2.2 Mechanické vlastnosti ohřivaného materiálu	13
1.3 Možné vady ingotů při ohřevu	14
2. NÁVRH MOŽNÝCH VSÁZEK INGOTŮ – TYPY INGOTŮ A ROZMÍSTĚNÍ V PEČI	15
2.1 Typy Ingotů	15
2.1.1 Stručný popis výroby ingotu v PS	15
2.1.2 Rozdělení ingotů - ingotová řada.....	17
2.1.3 Rozdělení ingotů dle jejich teploty.....	18
2.2 Možnosti rozložení materiálu v pecním prostředí	19
2.2.1 Teorie rozložení materiálu v pecním prostoru	19
2.2.2 Rozložení vsázky v peci ve společnosti Pilsen steel	19
3. STANOVENÍ MOŽNÉHO VLIVU TECHNOLOGICKÉ NEKÁZNĚ NA PRŮBĚH A VÝSLEDEK OHŘEVU – PODCHYCENÍ HLAVNÍCH FAKTORŮ, VYTVOŘENÍ NUMERICKÉHO MODELU	21
3.1 Hlavní faktory ohřevu	21
3.1.1 Režim ohřevu.....	21
3.1.2 Režim ohřevu v PS	21
3.2 Statistika reálného ohřevu	24
3.2.1 Vytvoření statistiky a následně sestavení modelu	25

4. NUMERICKÁ ANALÝZA KOMPLEXNÍCH VSÁZEK INGOTŮ A JEJICH POROVNÁNÍ Z HLEDISKA PŮSOBENÍ RADIČNÍHO TEPLA.....	29
4.1 Typy teplotních úloh a teorie metody konečných prvků	29
4.2 Popis vybraného softwaru	32
4.2.1 Základní části softwaru DEFORM	33
4.3 Nastavení vstupních dat simulace	37
4.3.1 Zpřesnění dat materiálu 34CrNiMo6	37
4.3.2 Vytvoření teplotního pole Ingotu I 45 VNH	38
4.3.3 Rozložení teploty v modelu	39
4.3.4 Nastavení podmínek výpočtu v softwaru Deform - 2D	40
5. HODNOCENÍ SIMULACE POSTPROCESSOR	45
5.1 Rozložení teploty a napětí v čase v jednotlivých bodech	45
5.2 Rozložení teploty a napětí v jednotlivých bodech.....	46
5.3 Porovnání teplotního a napěťového pole v ingotu	47
5.3.1 Teplotní a napěťové pole v ingotu bez uvažování strukturního napětí.....	47
5.3.2 Teplotní a napěťové pole v ingotu s uvažováním strukturního napětí.....	48
ZÁVĚR:	51
POUŽITÁ LITERATURA:	52

Úvod:

U polygonálních ingotů z materiálu 34CrNiMo6 občas dochází ke vzniku trhlin, které se nejčastěji objevují během kování. První kroky k vyřešení problému vedly k úpravám technologie kování. Tato změna však nepřinesla požadované výsledky a proto se připustila možnost, že dané trhliny nevznikají během kování, ale už při samotném ohřevu daného ingotu. [1] Při sledování těchto trhlin se ukázalo, že místa jejich vzniku jsou podobná, a dále že se tvoří na bocích ingotů přivrácených k pecní vyzdívce. Byly provedeny první simulace přestupu tepla v peci, které měly ukázat vliv pecní vyzdívky na daný ingot. Uvažoval se ingot I 45 VNH o teplotě 600 °C, který byl vložen metr od stěny do pece vytopené na 1150°C. Výpočty měly prokázat, zda existuje takový tepelný šok, který může způsobit vznik trhlin. Simulace ukázaly, že na sledovaných místech byly naměřeny takové hodnoty napětí, které mohly způsobit vznik trhlin. Úloha byla posléze rozšířena na výpočet pro dva ingoty v peci, aby bylo možno stanovit vliv radiačního stínění. I tento výpočet prokázal nezanedbatelný vliv tepelného šoku na vznik napětí, které může vést až ke vzniku trhlin [23,24].

Další kroky vedly ke zpřesnění těchto výpočtů. Zásadní zde byl vliv vsázky ingotů. Úvaha byla taková, že budeme mít pec a v ní ingoty vytopené na určitou teplotu. Po nějaké době bude vložen ingot, na kterém bude sledován vliv sálání nejen pecní vyzdívky, ale i samotných ingotů. Sledovaný ingot bude mít navíc zpřesněná materiálová data a bude v něm vytvořeno teplotní pole. Veškeré hodnoty rozměrů ingotů, rozložení ingotů v peci, teplot atd. vychází z praktické analýzy, která proběhla v provozu kovárna společnosti Pilsen Steel. Jinak řečeno tato práce měla za úkol na základě reálných podmínek provozu sestavit co nejpřesnější počáteční podmínky výpočtu a poté provést samotný výpočet v softwaru založeném na principu metody konečných prvků.

V diplomové práci je v první kapitole shrnuta problematika ohřevu ingotů. Je zde popsána teorie přestupu tepla, a to jak obecně, tak i v prostředí pece. Dále pak vliv teploty na vlastnosti materiálu a možné vady, které mohou vznikat při ohřevu ingotů. Další kapitola je věnována popisu a rozdělení ingotů, dále zásadám uložení ingotů v peci nejprve obecně a následně pro porovnání dle společnosti Pilsen Steel. Kapitola třetí je věnována stanovení zásad ohřevu ingotů, a to nejprve teoreticky a poté způsobu ohřevu v společnosti Pilsen Steel. Součástí této kapitoly je i vyhodnocení měření a vytvoření statistiky, podle které byly formulovány podmínky výpočtu. Kapitola druhá a třetí měly za úkol do určité míry popsat cestu ingotu od odlití až po samotné vložení do pece a zjistit, zda nedochází k technologické nekázni. Zároveň měly porovnat teoretické znalosti s praktickým fungováním provozu. Předposlední kapitola je nejprve věnována teorii metody konečných prvků a softwarům na této metodě založené, dále pak nastavení samotného výpočtu. V poslední kapitole jsou shrnuty a vyhodnoceny výsledky výpočtů.

Použitá označení a symboly:

Název veličiny	Značka veličiny	Mezinárodní značka jednotky SI
teplo, množství tepla	Q	J
termodynamická teplota	T	°K
součinitel tepelné vodivosti	λ	W/(m · K)
součinitel přestupu tepla	α	W/(m ² · K)
hustota (hmotnosti)	ρ	kg/m ³
měrné teplo	C	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
zářivost černého tělesa	E_0	W/ m ²
plocha	S, A	mm ² , m ²
napětí	σ	MPa
délka	l	mm
teplota	T	°C

1. Problematika ohřevu ingotů – faktory ovlivňující povrchovou kvalitu ohříváných ingotů

Cílem ohřívacího pochodu je ohřát ingot na požadovanou teplotu s přípustnou nerovnoměrností teplotního pole v průřezu ohříváného tělesa tak, aby celistvost tělesa nebyla narušena většími či menšími trhlinkami, a aby byly splněny ostatní technicko-hospodářské ukazatele, např. spotřeba energie na konkrétní způsob ohřevu apod. [4].

Tato kapitola se zabývá problematikou teorie přestupu tepla nejprve v rovině obecné, poté přímo v aplikaci v pecním prostředí, dále vlivem teploty na vlastnosti ohříváného materiálu a v neposlední řadě vadami, které mohou vznikat v průběhu ohřevu.

1.1 Teorie přestupu (sdílení) tepla

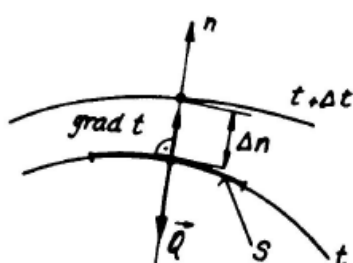
1.1.1 Obecná teorie přestupu tepla

Rozlišujeme tři základní způsoby sdílení tepla [2]:

- sdílení tepla vedením (kondukcí) – tento způsob je charakteristický pro sdílení tepla v pevných látkách,
- sdílení tepla prouděním (konvekci) – tento způsob je charakteristický pro sdílení tepla v tekutých látkách (kapaliny, plyny),
- sdílení tepla zářením (radiací) – podstatou tohoto způsobu je sdílení tepla prostřednictvím tzv. teplotního záření.

1.1.1.1 Vedení tepla

Jak již bylo řečeno, hovoříme-li o vedení tepla, jedná se o šíření tepla v pevných látkách. Množství tepla procházející pevnou látkou je přímo úměrné teplotnímu rozdílu ve směru toku energie, dále je přímo úměrný ploše kolmé na směr toku a nepřímo úměrný vzdálenosti teplotních rovin. Tato závislost je popsána tzv. Fourierovým zákonem pro vedení tepla (rovnice 1) [5].



$$Q = -\lambda S \text{grad} t \quad (1)$$

Tepelný tok Q je vektor a má rozměr [W], S [m^2] značí plochu, kterou teplo prochází a $\text{grad} t$ je symbolické označení gradientu teplotního pole (rovnice 2).

$$\text{grad} t = \lim_{\Delta n} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2)$$

Obr. 1 Gradient teploty

Teplotní gradient je vektor, jehož směr je opačný než směr tepelného toku Q , což je respektováno záporným znaménkem viz (rovnice 1). Dále se ve vzorci vyskytuje λ [W/mK]

což je tepelná vodivost, která je jednou z termofyzikálních vlastností a bude popsána v kapitole 1.2. Vedení tepla můžeme dělit na časově ustálené (stacionární) a časově neustálené (nestacionární).

- Stacionární vedení tepla – o jednorozměrném vedení tepla hovoříme tehdy, když se teplota v daném tělese mění jen v závislosti na jedné souřadnici. Například při řešení vedení tepla rozlehlou stěnou domu lze předpokládat, že tepelný tok je přenášen rozhodující měrou jen ve směru stěny, a tudíž teplota se mění jen v závislosti na poloze napříč stěnou. Předpokládáme tedy, že v dalších dvou směrech se tepelný tok nemění. Tento předpoklad je fyzikálně reálný, protože rozměry v dalších dvou směrech jsou mnohem větší, než tloušťka stěny. Odtud pak plyne celková hodnota odporu proti vedení tepla, který prakticky zabraní toku tepla v tomto směru. Jinak řečeno v tomto směru není teplotní spád – gradient [3].
- Nestacionární vedení tepla – v praxi se setkáváme s velkým množstvím případů, kdy je nutno znát teplotní průběh v tělese v závislosti na čase. Třeba doba, za kterou se dané těleso při určitých podmínkách ohřeje na danou teplotu v peci. Pokud bychom například měli rovinnou desku, která má pouze jediný konečný rozměr a to tloušťku, na počátku má deska rovnoměrnou teplotu. Když je deska umístěna do prostoru o teplotě vyšší, než byla počáteční, začne se deska zahřívat. Nejprve na povrchu a postupně tato změna bude pronikat dovnitř desky. Celý tento děj skončí po dosažení nového ustáleného stavu. Nás zajímá, jak rychle ohřev desky probíhá a jaká je v různých místech desky v určitém čase okamžitá teplota. Teplotní chování desky je popsáno parciální diferenciální rovnicí. Vzhledem k tomu, že řešená teplota je funkcí nejen souřadnice, ale i času, musíme znát příslušné okrajové podmínky [3].

Tyto podmínky jsou [3]:

1. Prvního druhu – kdy je zadaná teplota na okrajích tělesa,
2. Druhého druhu – kdy je znám tepelný tok, který je definován Fourierovým zákonem pomocí gradientu,
3. Třetího druhu – kdy je na hranicích tělesa definován tepelný tok pomocí teploty okolí.

1.1.1.2 Proudění

Sdílení tepla prouděním se rozumí přenos tepla pohybující se tekutinou (kapaliny, plyny). V tekutině může docházet k vedení tepla jako v tuhém tělese v případě, že je zabráněno proudění tekutiny (tekutina v malém prostoru bez vnějších účinků). Obecně však přenos tepla v tekutině je spojen se současným prouděním tekutiny [7]. Rozlišujeme dva způsoby sdílení tepla pomocí proudění, a to [3,5]:

- Nucená konvekce – jestliže je pohyb tekutiny vyvolán vnějšími účinky (ventilátorem, čerpadlem, atd.),
- Přirozená konvekce – jestliže je proudění tekutiny vyvoláno změnou hustoty vlivem ohřevu tekutiny a gravitací,

Teplo sdílené konvekcí se obvykle vyjadřuje pomocí empirického Newtonova zákona (rovnice 3):

$$q = \alpha(T_s - T_t) \quad (3)$$

kde α je součinitel přestupu tepla a má rozměr $[W/(m^2 \cdot K)]$. Newtonovým zákonem se řešení konvekce tepla přenáší na stanovení součinitele přestupu tepla. Pro praktické výpočty se přestup tepla stanovuje experimentálně, nejčastěji na modelu. Pomocí teorie podobnosti se výsledky experimentu přenesou na dílo. Součinitel přestupu tepla lze také vypočítat pomocí rovnice, která je popsána v kapitole 1.2.1.4.

1.1.1.3 Záření

Prozatím byly vysvětleny dva základní mechanismy přenosu tepla – vedení a konvekce. V obou mechanismech bylo teplo přenášeno pomocí „zprostředkované látky“. Pokud hovoříme o vedení tepla, museli bychom vždy mít nějakou látku (hmotu), kde se teplo šíří vedením. Když hovoříme o konvekci, musí naopak jít o proudící tekutinu, která odvede nebo přivede teplo, nejčastěji pevné stěně [3].

V případě radiace dochází k přestupu tepla z jednoho místa na druhé, aniž by muselo být přítomno nějaké zprostředkující médium. Tepelné záření je v podstatě elektromagnetické záření, které je výsledkem tepelné diference. Hovoříme-li o tepelném záření, máme na mysli záření o vlnových délkách 0,1 μm až 100 μm . Tepelná energie je předávána ve formě kvant. Tato kvanta obsahují určitou hodnotu energií. Pevné látky, kapaliny a některé plyny emitují tepelnou energii jako výsledek skutečnosti, že mají svou teplotu. [3,2].

Základním zákonem, který popisuje chování tepelného záření na povrch černého tělesa je tzv. Stefanův – Boltzmannův zákon (rovnice 4) [3]:

$$E_o = c_o \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (4)$$

Tento zákon vyjadřuje úhrnné množství tepla, které vysálá jednotková plocha černého tělesa za jednotku času. Jinak řečeno je to tepelný tok sálavého tepla z dokonale černého tělesa, kde E_o je tepelný tok $\left[\frac{W}{m^2} \right]$, T je teplota [K] a $c_o = 5,676 \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ [7]. Skutečné černé těleso v přírodě najdeme jen vzácně. Proto se zaměříme na přenos tepla mezi šedými povrchy.

Vlastnosti radiačního přenosu – když na daný povrch (ne černý), dopadá nějaké zářivá energie, část z ní může být odražena (dochází k reflexi – r), část pohlcena (absorpci – a) a část může projít (transmise – t) platí (rovnice 5) a po úpravě (rovnice 6) [3,7]:

$$Q_{dop} = rQ_{dop} + aQ_{dop} + tQ_{dop} \quad (5)$$

$$1 = r + a + t \quad (6)$$

1. $A = 1 \rightarrow$ těleso dokonale černé.
2. $T = 1 \rightarrow$ těleso dokonale průteplivé
3. $R = 1 \rightarrow$ těleso dokonale odrazivé

Přenos tepla mezi šedými povrchy – máme-li řešit přenos tepla mezi šedými povrchy či tělesy, je situace mnohem složitější, protože ne všechna energie, která dopadne, je absorbována. Část je odražena zpět na jiný povrch a část může být odražena úplně mimo uvažovaný systém. Problém se komplikuje také proto, že energie může být odražena mezi povrchy tam a zpět i několikrát [3].

Sdílení tepla vzájemným zářením – sdílení tepla zářením je výsledkem vzájemného přenosu vyzářeného výkonu mezi dvěma nebo více tělesy. Mějme dvě tělesa zahřátá na různou teplotu a o různém povrchu. V případě, kdy první těleso vysílá svou celkovou energii, avšak na těleso druhé dopadne pouze část této energie z povrchu prvního tělesa (zde hrají velký vliv i stanovení plochy těles, které souvisí s geometrií tělesa). Podobná situace nastane i na tělese druhém. Přenos tepla z jednoho na druhé těleso je popsán tepelným tokem a je dán rozdílem výkonu z prvního tělesa na druhý a z druhého na první. Pokud však nejde o těleso černé nebo průteplivé (tedy takové, které je schopno pohlcovat elektromagnetické záření), odrazí se zpět k tělesu dvě část tohoto výkonu. Podobné je to i u tělesa dva [2].

1.1.2 Přestup tepla v pecním prostředí

Ohřev kovu v pracovním prostoru jakékoliv plamenné pece patří k procesům značně složitým, neboť zahrnuje přestup tepla mezi třemi (čtyřmi uvažujeme-li plamen) „tělesy“ a to:

- plynnou vrstvou
- ohříváním materiálem
- pecním zdivem
- v některých případech i plamenem

Výměna tepla mezi těmito tělesy je určena zářením, konvekcí a ve vlastním materiálu kondukcí. Děje přitom spadají do oblasti nestacionárních dějů. K těmto základním procesům dále patří aerodynamika spalin i kompletní fyzikálněchemické jevy. Sdílení tepla v pecním prostoru můžeme rozdělit na oblasti [4]:

- Vnější – ke sdílení tepla dochází mezi žhavými spalinami, ohříváním materiálem a pecním zdivem,
- Vnitřní – v této oblasti dochází ke sdílení tepla kondukcí uvnitř ohříváního materiálu.

Poměr mezi oběma oblastmi udává tzv. Biotovo kritérium viz (rovnice 7):

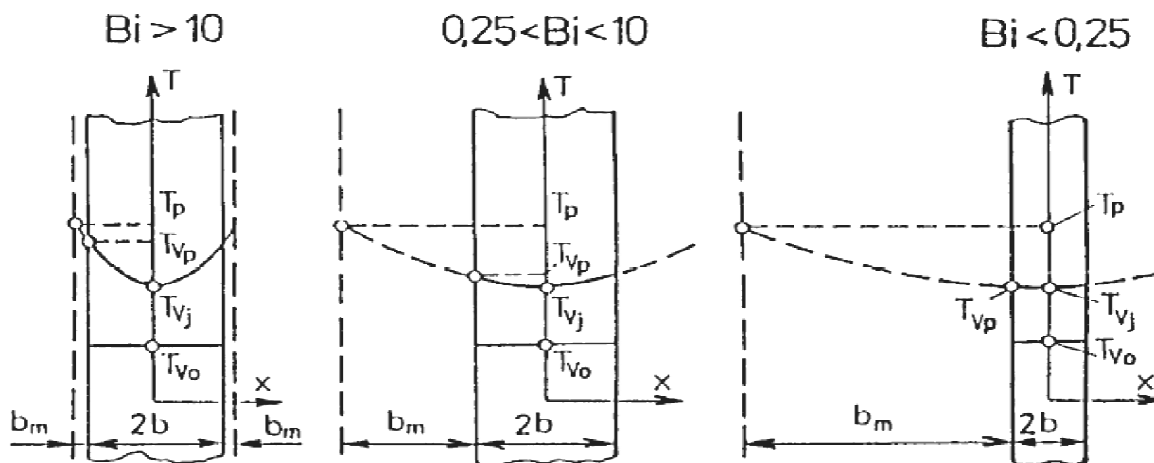
$$Bi = \frac{\alpha_{\Sigma} b}{\lambda_m} = \frac{1}{\frac{\lambda_m}{\alpha_{\Sigma}}} \quad (7)$$

kde α_{Σ} je celkový součinitel vnějšího přestupu tepla zářením a konvekcí $[\frac{W}{m^2}]$, λ_m je tepelná vodivost ohřivaného materiálu $[\frac{W}{m}]$ a b je rozměr [m].

1.1.2.1 Rozlišení vsázky na tenká a tlustá tělesa

Teorie ohřevu kovu dělí tělesa na tenká a tlustá se zřetelem k teplotnímu spádu po průřezu ohřivaného kovu. U tenkých těles probíhá ohřev rovnoměrně po celém průřezu. Z toho plyne, že tepelný spád po průřezu tělesa je nepatrný a nemusí se ve výpočtech respektovat. Ve výpočtech ohřívání tenkých těles je rozhodující vnější přestup tepla na tělesa. Ohřev tlustých těles je doprovázen větším či menším tepelným spádem mezi povrchem a středem ohřivaného tělesa. Při výpočtu je tedy potřeba uvažovat nejen vnější, ale i vnitřní přestup tepla [4].

Teplotní rozdíl u ohřivaného tělesa nebude dán pouze tloušťkou tělesa, ale i jeho tepelnou vodivostí a rychlostí ohřevu. Těleso větších rozměrů se tedy může ohřívát jako tenké těleso a naopak těleso malých rozměrů při značných ohřívacích rychlostech jako těleso tlusté. Jak již bylo řečeno, pro rozlišení na tenká a tlustá tělesa se používá Biotovo kritérium (obr. 2) [4].



Obr. 2 Teplotní pole v tuhých tělesech – Biotovo kritérium [5]

Kde platí $Bi > 10$ jedná se o tlustá tělesa, $Bi < 0,25$ se jedná o tenké těleso, $0,25 < Bi < 10$ se jedná o přechodné, ale užívá se jako tlusté.

1.1.2.2 Vnější přestup tepla na vsázku

Vnější přestup tepla zachycuje výměnu tepelné energie mezi spalinami, zdivem a ohřivaným materiálem. Jedná se z hlediska matematické formulace o záležitost velmi složitou, při níž je nutno respektovat tyto děje [4]:

Spaliny, vzniklé jako produkt hoření paliva s určitým množstvím spalovacího vzduchu, mají mezi těmito tělesy nejvyšší teplotu, a tedy podle druhého zákona termodynamického předávají svou sálavou energii na povrch ohřivaného materiálu i na vnitřní povrch pecního zdiva. Část sálavé energie dopadající na oba povrchy těchto šedých

těles se pohlcuje, zbytek energie se odráží zpět do pracovního prostoru. V tomto prostoru se část energie pohlcuje v neprůteplivé vrstvě spalin a zbylá část opět dopadá na povrchy šedých těles (materiál, zdivo), částečně se pohlcuje a částečně odráží. Proces se stále opakuje, pokud v nekonečné řadě odrazů a pohlcování sálavé energie nenastane její úplné pohlcení ohraničujícími povrchy šedých těles. Do procesu výměny tepla spadá i vzájemné sálání mezi dvěma šedými tělesy (ohřívaným materiálem a pecním zdivem), jenž je závislé mimo jiné i na vzájemné poloze obou těles [4].

Následkem proudění spalin pecním systémem dochází i ke konvekčnímu přenosu tepla ze spalin na tuhá tělesa. Tento způsob přestupu tepla se podílí zhruba 10 – 30 % na celkové výměně. Podle první věty termodynamiky dopadá na povrch tuhých těles v pecním prostoru množství tepla, které je dáno rozdílem mezi součtem všech sálavých toků a tepla předaného zkoumanému povrchu konvekcí, od nichž je odečteno teplo odvedené z povrchu vlastním sáláním. Je-li zkoumaným povrchem vnější plocha ohřívaného materiálu, je výsledkem tepelným tokem užitečně teplo přijaté materiálem. Jde-li o povrch pecního zdiva, je rezultujícím tepelným tokem ztráta tepla zdivem do okolí.

1.1.2.3 Vnitřní přestup tepla

V tlustých tělesech, v nichž během ohřevu vzniká teplotní spád po průřezu ohřívaného tělesa, probíhá ohřivací pochod podle složitějších zákonů ve srovnání s ohřevem tenkých těles. Kromě vnějšího přestupu tepla je nutno sledovat i vnitřní přestup tepla, tj. šíření tepla z povrchu kovu do jeho středu [4].

Praktické výpočty vnějšího i vnitřního přestupu tepla jsou poměrně složité. Jedná se o řešení parciálních diferenciálních rovnic pomocí různých metod. V současné době se využívá moderních výpočetních softwarů založených na různých metodách vypočtu. V kapitole 4. bude popsána jedna z metod výpočtu pomocí FEM (metoda konečných prvků), dále softwaru dostupné na trhu a zároveň popis softwaru, který bude využit k řešení problematiky v této diplomové práci.

1.2 Vliv teploty na vlastnosti materiálu

Při ohřevu materiálu dochází ke změnám vlastností materiálu, a to jak fyzikálních vlastností, tak i mechanických vlastností. V této kapitole budou popsány vlastnosti, které jsou důležité pro ohřev kovů.

1.2.1 Fyzikální vlastnosti ohřívaného materiálu

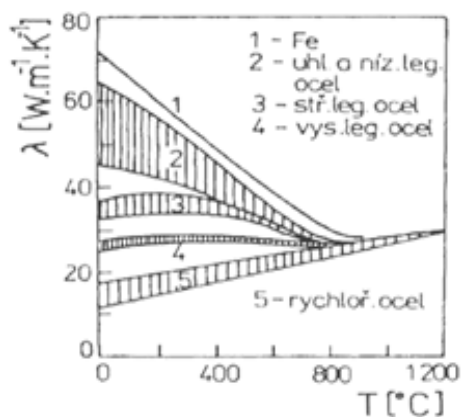
K fyzikálním vlastnostem, které mají vliv na šíření tepla v tuhém tělese, patří tepelná vodivost, měrné teplo, měrná hmotnost a součinitel tepelné vodivosti.

1.2.1.1 Tepelná vodivost (λ)

Tepelná vodivost charakterizuje schopnost kovů vést teplo. Tato schopnost závisí na kmitavém pohybu molekul, rozložení atomů v krystalické mřížce a volné dráze elektronů. Čisté kovy mají větší tepelnou vodivost než slitiny, neboť mají delší vodivé dráhy elektronů a pravidelnější rozložení atomů v krystalické mřížce. Naopak tomu je u slitin nebo kovů

s příměsemi. Tento jev se zvláště projevuje u legovaných ocelí, neboť jejich tepelná vodivost při pokojové teplotě je několikrát nižší, než u tepelné vodivosti uhlíkových ocelí [4].

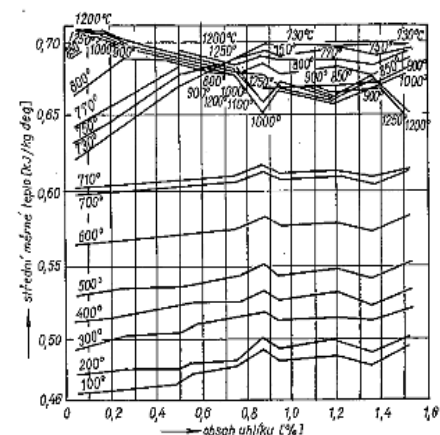
Jestliže zvýšíme teplotu, dojde ke zkrácení volné dráhy elektronů tak, že se tepelná vodivost čistých kovů i uhlíkových ocelí snižuje. Tepelná vodivost legovaných ocelí se při zvýšení teploty poněkud zvyšuje, neboť u těchto materiálu se umístění atomů v krystalické mřížce stává pravidelnějším a obsah příměsí pouze v menší míře uplatňuje svůj nepříznivý vliv na strukturu. Tepelná vodivost ocelí závisí na složení oceli, teplotě, struktuře, homogenitě a také na podmínkách tepelného zpracování. Tepelná vodivost se stoupajícím % C klesá. Tento vliv uhlíku je obzvláště patrný při jeho malých koncentracích (do 0,2 %). Ostatní příměši (Mn, Si, S a P) také tepelnou vodivost uhlíkových ocelí snižují. U litých kovů (ingoty, odlitky) je tepelná vodivost vždy poněkud nižší, a to zhruba o 10 až 15 %. Minimální hodnoty tepelné vodivosti uhlíkových ocelí zaznamenáváme při $T = 800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Nad touto hodnotou tepelná vodivost poněkud vzrůstá. Z legujících prvků nejvíce snižují tepelnou vodivost Cr a Ni. Obecně platí, že legované oceli jsou méně vodivé než uhlíkové a vysokolegované oceli jsou méně vodivé než nízkolegované a středně legované (viz obr. 3) [4].



Na obrázku 3. můžeme vidět tepelnou vodivost různých druhů ocelí v závislosti na teplotě. Z grafu vyplývá, že se vzrůstající teplotou klesá tepelná vodivost čistého kovu, uhlíkových a nízkolegovaných až do teploty kolem $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Po této teplotě dochází ke zvyšování tepelné vodivosti. U ocelí střednělegovaných a vysokolegovaných můžeme vidět nejprve nárůst tepelné vodivosti do teploty kolem $350 \text{ }^\circ\text{C}$, poté dochází opět k poklesu do teploty $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Následuje opět nárůst. U rychlořezných ocelí je patrný nárůst tepelné vodivosti se zvyšující se teplotou.

Obr. 3 Tepelná vodivost kovů při různých teplotách

1.2.1.2 Měrné teplo (c)



Obr. 4 Závislost středního měrného tepla uhlíkové ocelina teplotě a obsahu uhlíku

Měrné teplo je definováno jako množství tepla, kterým se teplota definované hmoty zvýší o jeden stupeň Kelvina [7]. Z kovů má největší měrné teplo při pokojové teplotě hliník, pak následuje železo a další kovy. Měrné teplo ocelí stejně jako slitin závisí na chemickém složení, teplotě a struktuře. Železo patří ke skupině kovů, jejichž měrné teplo se v závislosti na teplotě vyznačuje nerovnoměrným průběhem v některých teplotních intervalech. Do této skupiny patří také Ni, Cr, Sn, Mn a Co. Střední měrné teplo uhlíkových ocelí v závislosti na obsahu uhlíku je pro různé teploty uvedeno na (obr. 4). Přibližně do teploty asi $500 \text{ }^\circ\text{C}$ roste měrné teplo v oceli rovnoměrně a pozvolna. Nad touto teplotou pak prudčeji

a v rozmezí teplot 700 až 900 °C tvoří výrazné maximum, které je způsobeno tepelnými účinky strukturních přeměn [4].

Lze říci že [4]. :

- Chemické složení oceli má jen nepatrný vliv na její měrné teplo.
- Měrné teplo uhlíkových a legovaných ocelí roste se zvyšující se teplotou kovu.
- V kritickém intervalu teplot (při strukturních přeměnách) nastává značné kolísání měrného tepla. Právě měrná tepla uhlíkových ocelí se značně zvyšují v kritickém teplotním intervalu.

1.2.1.3 Měrná hmotnost kovů (ρ)

Průběh ohřívacího pochodu je také nemálo ovlivněn hodnotou měrné hmotnosti kovu. Je třeba mít na paměti, že zvýšení měrné kovů má za následek pohlcení většího množství tepla ve stejném objemu, jinými slovy je nutno v takovémto případě prodloužit dobu ohřevu kovu i vyrovnání teplot po jeho průřezu. Měrná hmotnost oceli závisí na chemickém složení, struktuře a teplotě. U převážné většiny ocelí uhlíkových i legovaných se pohybuje ρ v rozmezí teplot 0 až 1100 °C mezi hodnotami 7800 až 7400 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ [4].

1.2.1.4 Součinitel teplotní vodivosti (α)

Jak již bylo uvedeno, tepelná vodivost charakterizuje schopnost kovu vést teplo. Čím je větší tepelná vodivost, tím při jinak stejných podmínkách nastává rychleji změna teplot v tělese. Teoretické i experimentální práce prokázaly, že rychlost teplotních změn je přímo úměrná tepelné vodivosti a nepřímo úměrná měrné hmotnosti a měrnému teplu. Veličina, která zachycuje tuto závislost a charakterizuje rychlost teplotních změn ohříváního tělesa, se nazývá součinitel teplotní vodivosti α . Platí [4]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (8)$$

Se změnou teploty se mění i součinitel tepelné vodivosti v závislosti na tepelné vodivosti, měrné hmotnosti a měrného tepla. V tabulce 1. jsou uvedeny střední hodnoty tepelných vlastností kovů v intervalu teplot 0 až 100 °C a hustota kovu při 25 °C.

kov	$c [J.kg.K^{-1}]$	$\lambda [W.m^{-1}K^{-1}]$	$\alpha [10^6K^{-1}]$	$\rho [kg m^{-3}]$
Al	917	238	23,5	2700
Cr	461	98	6,5	7100
Mn	486	78	23,0	7400
Mo	251	137	5,1	10200

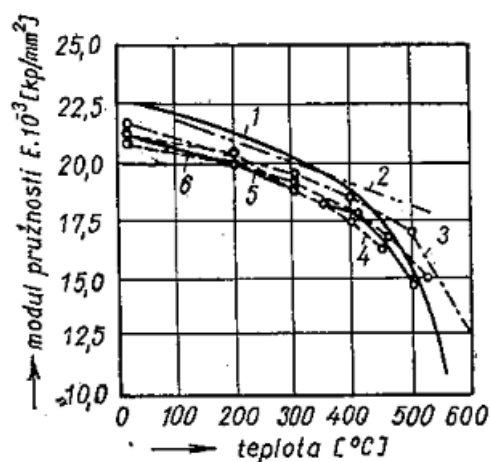
Ni	452	89	13,3	8900
Ti	528	22	8,9	4500
W	138	174	4,5	1930

Tabulka 1. Střední hodnoty tepelných vlastností kovů [5].

1.2.2 Mechanické vlastnosti ohřivaného materiálu

Při ohřevu některých ocelí v nich vznikají tepelná pnutí. Při jejich vzniku hrají důležitou úlohu pružné a plastické vlastnosti oceli.

1.2.2.1 Pružné vlastnosti materiálu



Pružné vlastnosti materiálu jsou charakterizovány modulem pružnosti E . Modul pružnosti závisí na chemickém složení a teplotě (viz obr. 5). Při pokojové teplotě se modul pružnosti pohybuje v rozmezí $17 \cdot 10^{-2}$ až $21,57 \cdot 10^{-2}$ MPa. Výjimku tvoří oceli s vysokým obsahem Ni. Při zvyšování teploty modul pružnosti klesá (při teplotě 500°C je o 20 % až 30 % menší než při 20°C). Při teplotě $500 - 550^\circ\text{C}$ ztrácejí uhlíkové oceli své pružné vlastnosti a ocel se dostává do plastického stavu [4]. Kde 1 – 6 jsou oceli např. 1 – ocel o složení: 0,1 % C, 0,42 % Mn, 0,13 % Si; 5 – nízkoalokovaná ocel; 6 – poměrný modul pružnosti.

Obr. 5 Závislost modulu pružnosti E na teplotě a na obsahu uhlíku v oceli

1.2.2.2 Plastické vlastnosti materiálu

Tyto vlastnosti jsou charakterizované poměrným prodloužením, tažností a příčným zúžením (kontrakcí). Hodnota ukazatelů se zvyšujícím obsahem příměsí v oceli klesá a pevnost v tahu i mez kluzu se zvyšují. Z hlediska plasticity lze rozdělit oceli do tří skupin [4]:

- oceli s vysokou plasticitou charakterizované poměrným prodloužením nad 25 % (nizkouhlíkové).
- oceli se střední plasticitou s poměrným prodloužením v rozmezí 15 až 25 % (konstrukční a legované oceli).
- oceli s nízkou plasticitou, u nichž poměrné prodloužení nepřesahuje 15 % (oceli s vysokým obsahem uhlíku a chromu).

Při ohřevu se hodnota poměrného prodloužení i zúžení nepatrně zmenšuje na rozdíl od meze pevnosti v tahu a meze kluzu, které se zvětšují. Výjimku tvoří oceli, u níž je prodloužení pouze 1 až 2 % (oceli rychlořezné). Po dosažení více nebo méně výrazného minima, které je u různých druhů ocelí v teplotních mezích 200 až 600 °C, začíná opět poměrné prodloužení vzrůstat až do konečných ohřívacích teplot. Mez pevnosti v tahu a mez průtažnosti klesá po dosažení teploty 200 až 500 °C. Snížení plasticity v teplotním rozmezí 200 až 300 °C je způsobeno tzv. lámavostí za modrého žáru. Při ohřevu je nutno v některých případech přihlížet i k možnému snížení plasticity v intervalu kritických teplot, nebo v intervalech vzniku disperzních fází [4].

1.3 Možné vady ingotů při ohřevu

Následkem nerovnoměrnosti teplotního pole během ohřevu kovu v něm vznikají tepelná pnutí, která v některých případech mohou být limitujícím faktorem rychlosti ohřevu. Při ohřevu studené vsázky mají vnější vrstvy kovu vyšší teplotu než vnitřní, a proto také mají snahu se více roztahovat. Jelikož tomuto rozšíření brání sousední vrstvy, jsou vnější vrstvy ve stlačeném stavu pod tlakem. Naopak vnitřní vrstvy následkem nižší teploty, než je průměrná teplota kovu, a následkem rozšiřování vnějších vrstev budou v oblasti tahových napětí. Jsou tedy vnější vrstvy při ohřevu namáhány tlakem a vnitřní tahem. Tepelná pnutí vznikají tedy v kovu tehdy, jsou-li v něm teplotní rozdíly, a je-li zároveň kov v pružném stavu. Nepřevyšují-li tepelná pnutí mez pružnosti, pak při vyrovnání teplotního rozdílu zmizí i tepelná pnutí a lze tedy v tomto případě hovořit o pružném pnutí [4].

Nastane-li v některém místě plastická deformace, tj. překročení meze pružnosti, pak v těch místech tělesa, která nebyla plasticky deformována, nastane nové rozdělení tepelných pnutí. Po vyrovnání teplotních rozdílů zůstane v kovu tzv. zbytkové pnutí. Toto zbytkové pnutí lze zjistit v ingotech po jejich ochlazení. V konkrétních provozních podmínkách mohou tepelná pnutí vést k tvorbě trhlin nebo jiným poruchám kovu. Je tedy třeba v některých případech ohřevu kovu s těmito tepelnými pnutími počítat [4].

Velikost a rozdělení pnutí, stejně jako jejich vznik a odstranění, závisí jednak na podmínkách ohřevu a dále na mechanických a fyzikálních vlastnostech ohřívajícího materiálu, jeho rozměru a tvaru. Rozhodující jsou plasticita, pružnost, křehkost a pevnost kovu. Tyto vlastnosti však nemají absolutní a neměnnou hodnotu pro dané těleso v jeho určitém stavu, neboť jejich uplatnění závisí ve značné míře i na podmínkách podmiňujících pnutí a deformaci. Je známo, že plastický materiál může v určitých podmínkách působení pnutí být křehký a naopak. Obecně platí, že v podmínkách ohřevu je ocel elastická do teploty 500 až 550 °C, nad touto teplotou přechází ocel do plastického stavu. U uhlíkových ocelí je teplota přechodu do plastického stavu nižší, a to zhruba 400 °C. Měkké oceli se nacházejí v plastické oblasti již při teplotách mnohem nižších, tj. pod 400 °C [4].

Z uvedeného platí, že tepelná pnutí se v konkrétních podmínkách ohřevu vyskytují v první fázi ohřevu, a to v rozmezí teplot 0 až 500 °C. Nad touto teplotou se stává ocel plastickou a pnutí se snižují a rozptylují. U měkkých ocelí nemají tepelná pnutí ani v uvedeném intervalu teplot žádný význam [4].

2. Návrh možných vsázek ingotů – typy ingotů a rozmístění v peci

V této kapitole bude nejprve stručně vysvětlena výroba ingotu ve společnosti Pilsen Steel (dále jen PS) a poté bude popsána ingotová řada, která se používá pro výrobu výkovků nebo na export ingotu na další zpracování. V další části této kapitoly bude popsána teorie rozmístění vsázky v peci a následně způsob rozmístování dle společnosti PS.

2.1 Typy Ingotů

2.1.1 Stručný popis výroby ingotu v PS

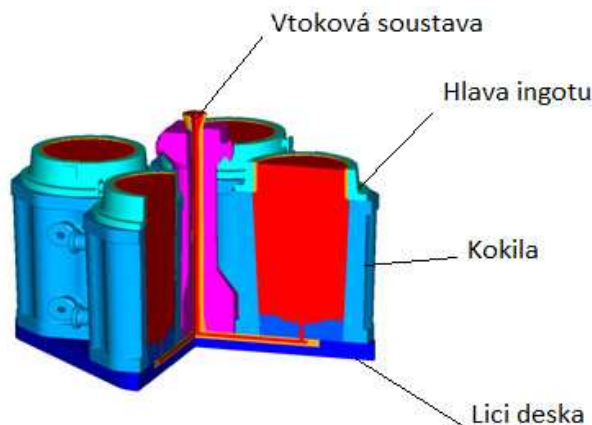
Pro odlévání oceli do kokil se využívá tři základních způsobů:

- Horem – odlévání neuklidněné oceli,
- Spodem – odlévání uklidněné oceli,
- Do vakua – odlévání horem do vakua. Tento způsob je poměrně nákladný a používá se především v zemích jako je např. Japonsko, kde je vysoké procento vlhkosti

Ve společnosti PS se používá odlévání oceli spodem pro uklidněnou ocel. K odlévání se využívají dva druhy kokil, a to válcové a mnohoúhelníkové (polygonální). Pro kování se používají především polygonální ingoty. Tento tvar je výhodnější s ohledem na nižší množství vnitřních vad v ingotu. Jelikož na průběh tuhnutí a na vnitřní nečistost má vliv mimo jiného [8]:

- Tvar kokil (především)
- Rychlost ochlazování
- Velikost ingotu
- Rychlost odlévání
- Teplota oceli
- Chemické složení

Pro odlévání se používají lící soupravy (viz obr. 6) [8]:



Obr. 6 Lící souprava pro odlévání spodem [8]

Základní postup lití [8]:

- Pánev se nastaví nad vtok lící soupravy,
- Odjede nad rest (nádoba pro odlití méně kvalitní oceli),
- Provede se odstřík cca 1 t,
- Přejede se zpět nad vtok lící soupravy,
- Odlije se požadovaná hmotnost do lící soupravy,
- Zbytek cca 3.5 t se odlije do restu.

Po odlití následuje ztuhnutí (doba tuhnutí se odvíjí od velikosti ingotu), např. I 85 (o vložené váze 77 t) tuhne cca 21 hodin. Po ztuhnutí nastává tzv. stripování – vytahování z kokily (viz obr. 7). To může být dvojího druhu [8]:

- Za tepla – teplý ingot určený pro převoz do kovárny nebo do žíhacích pecí
- Za studena – zejména export ingotů obvyklých jakostí



Obr. 7 Stripování ingotu (pomocí kleští) [22].

Stripování se provádí buď pomocí kleští, nebo vázacích prostředků (lana, řetězy). Postup stripování se skládá z [8]:

- Sundání hlavy
- Vlastní vytržení ingotu
- Nasazení na vůz s termoboxem
- Převoz do kovárny

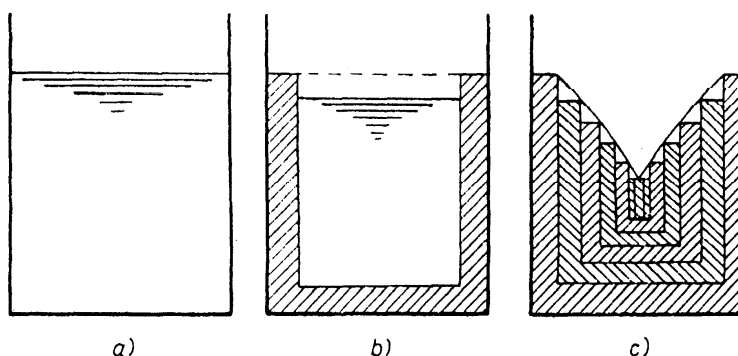
2.1.2 Rozdělení ingotů - ingotová řada

Tato diplomová práce se zabývá ohřevem polygonálních ingotů, které se používají pro ohřev v kovářských pecích a následně kování. Proto dále bude pozornost věnována pouze těmto ingotům. Ve společnosti PS existuje tzv. ingotová řada, ve které jsou uvedeny ingoty pod svým názvem, který se skládá z písmene I (ingot) a čísla, které určuje pořadí v tabulce. Dále se pak používá označení NH, NHF, VNHF, VNH a NNH.

- NH - nová hlava
- NHF - nová hlava bez spodku
- VNHF - nová hlava bez spodku + vložka (pro zmenšení ingotu)
- VNH - nová hlava plus vložka
- NNH - nova hlava + nástavec (pro zvětšení ingotu)

Pozn. funkce hlavy [8] – zvýšení hustoty oceli při tuhnutí znamená postupné snižování objemu oceli dle (obr. 8). Hlava ingotu má za úkol dosadit objemový úbytek oceli tak, aby bylo tělo ingotu bez výraznějších dutin. Nutností je vysoká izolace hlavy ingotu, aby v hlavě zůstala ocel nejdéle tekutá, protože staženina v ingotu vzniká vždy v místě, kde se kov udržuje nejdéle tekutý.

NH (nová hlava) – toto označení se používá od doby, kdy dojde ke změně velikosti hlavy. Hlavním důvodem bylo snižování objemu kovu v hlavě a tím úspora materiálu.

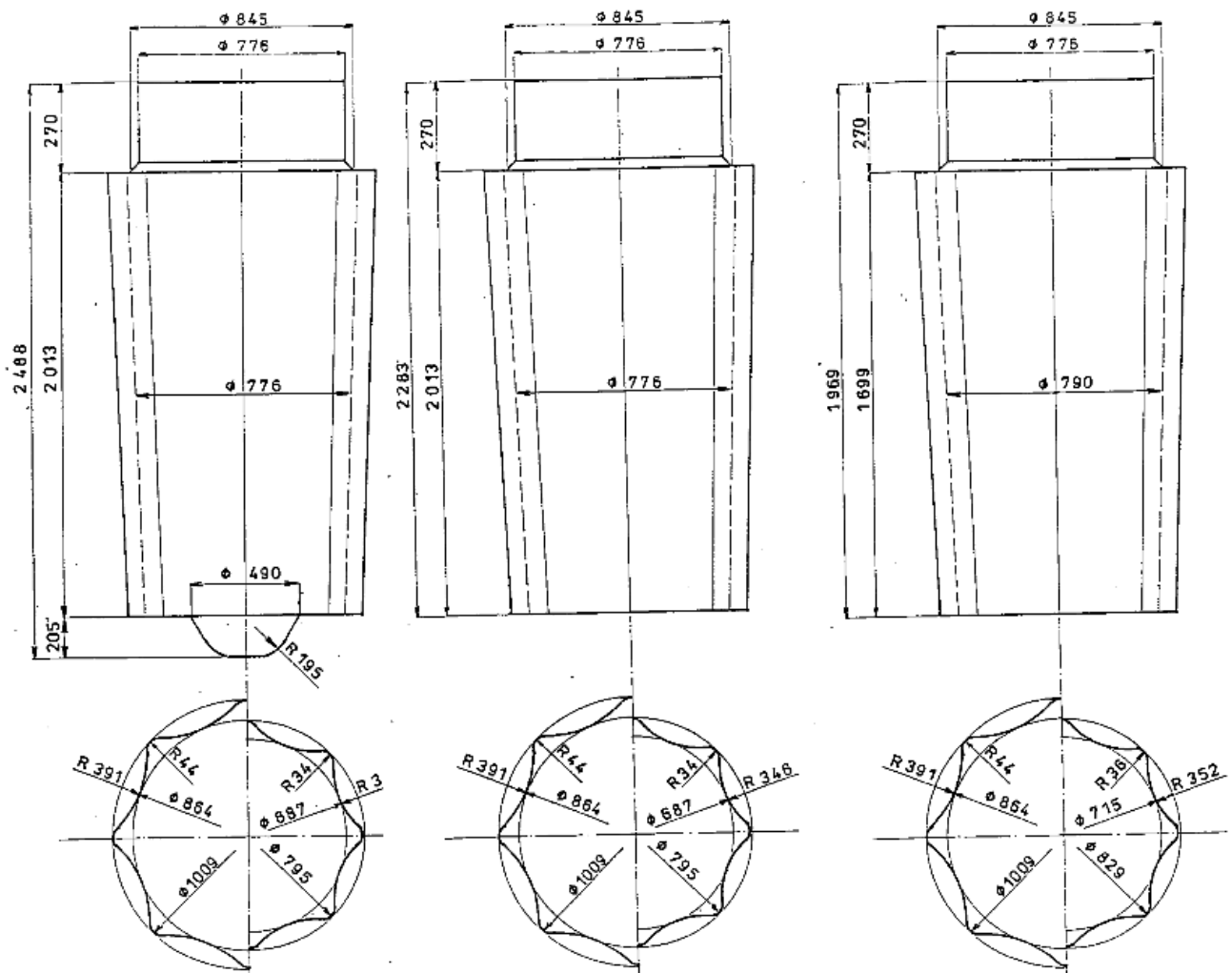


Obr 8. Snižování objemu oceli v hlavě [8].

Ingoty jsou řazeny dle své hmotností od I 5.7 NHF (kde vložená hmotnost je cca 5t) až po I 195 NH (kde je vložená hmotnost cca 195t). Vložená hmotnost je hmotnost ingotu bez hlavy a spodku. V tabulce jsou uvedeny pro každý ingot jeho charakteristiky [17]:

- Hmotnosti ingotu - hmotnost hlavy, hmotnost půdy, vložená hmotnost,
- Rozměry ingotu - výška těla, průměr těla, hodnoty petchování atd.,
- Využití ingotu - odvíjí se od čistoty výsledného výkovku,

Na obr. 9 můžeme vidět příklad výkresu ingotu 10 NHF, VNHF a NH [18]:



Obr. 9 Výkres ingotu 10 (zleva) NH, NHF a VNHF [18]

2.1.3 Rozdělení ingotů dle jejich teploty

Dalším způsobem, jakým lze rozdělit ingoty, které jsou určeny pro ohřev v kovářských pecích, je rozdělení dle jejich teploty na [9]:

- Studený ingot – je ingot, jehož teplota povrchu je před počátkem ohřevu i na nejteplejším místě menší než 400 °C,
- Poloteplý ingot – je takový ingot, jehož povrchová teplota je před počátkem ohřevu menší než 650°C a vyšší než 400°C,
- Teplý ingot – ingot dodávaný v teplém stavu z provozu ocelárny. Jeho povrchová teplota je před začátkem ohřevu v nejteplejším místě vyšší než 650 °C.

2.2 Možnosti rozložení materiálu v pecním prostředí

2.2.1 Teorie rozložení materiálu v pecním prostoru

Na ohřívací pochod mají kromě fyzikálních vlastností ohřivaného materiálu vliv i geometrické ukazatele tj. tvar, rozměry a uložení v pecním prostoru. V různých pecích se ohřívají různé materiály (ingoty, předvalky, bramy...), jejichž rozměry i hmotnost kolísají ve velmi širokých rozmezích. Uložení ohřivaného materiálu v peci je různé podle druhu a konstrukce pece, tvarů a rozměrů těles, způsobu sázení, pohybu v peci atd. Pro všechny platí základní zásady [4]:

- Poměr ohřivaného povrchu tj. povrchu, který je ve styku se spaliny, má být k váze co největší,
- Ohřev musí být symetrický.

Příklady uložení ohřivaného materiálu v pecním prostředí (viz obr. 10) [4]:

- Horizontální uložení jednotlivých ingotů nebo předvalků obdélníkového, čtvercového, kruhového, mnohohranného nebo prstencového průřezu, které jsou uloženy buď přímo na nístěji pece (1a) nebo na podstavcích (1b). Toto uložení je typické pro komorové pece, ať již kovářské nebo pro tepelné zpracování.
- Vertikální uložení ohřivaných těles, např. ingotů v hlubinných pecích, svitků ocelových pásů v poklopových pecích nebo dutých či plných hřidelů ve svislých pecích na tepelné zpracování.
- Horizontální uložení několika ingotů nebo předvalků o různém tvaru průřezové plochy tak, aby mezi nimi vznikly mezery: materiál může být uložen buď na nístěji (3a) nebo na podstavcích (3b). Poté se použije spodního ohřevu. Uložení je typické pro komorové pece.
- Horizontální uložení ingotů nebo předvalků v řadách v průběžných strkacích pecích. Průřez materiálu může být pravouhlý nebo kruhový. Uložení materiálu může být buď na nístěji (4a), nebo na chlazených skluznicích či podstavcích (4b). Pak se použije spodní ohřev.
- Ploštiny je možno ukládat v pecním prostoru buď vertikálně (v průběžných pecích, nebo jednotlivě.

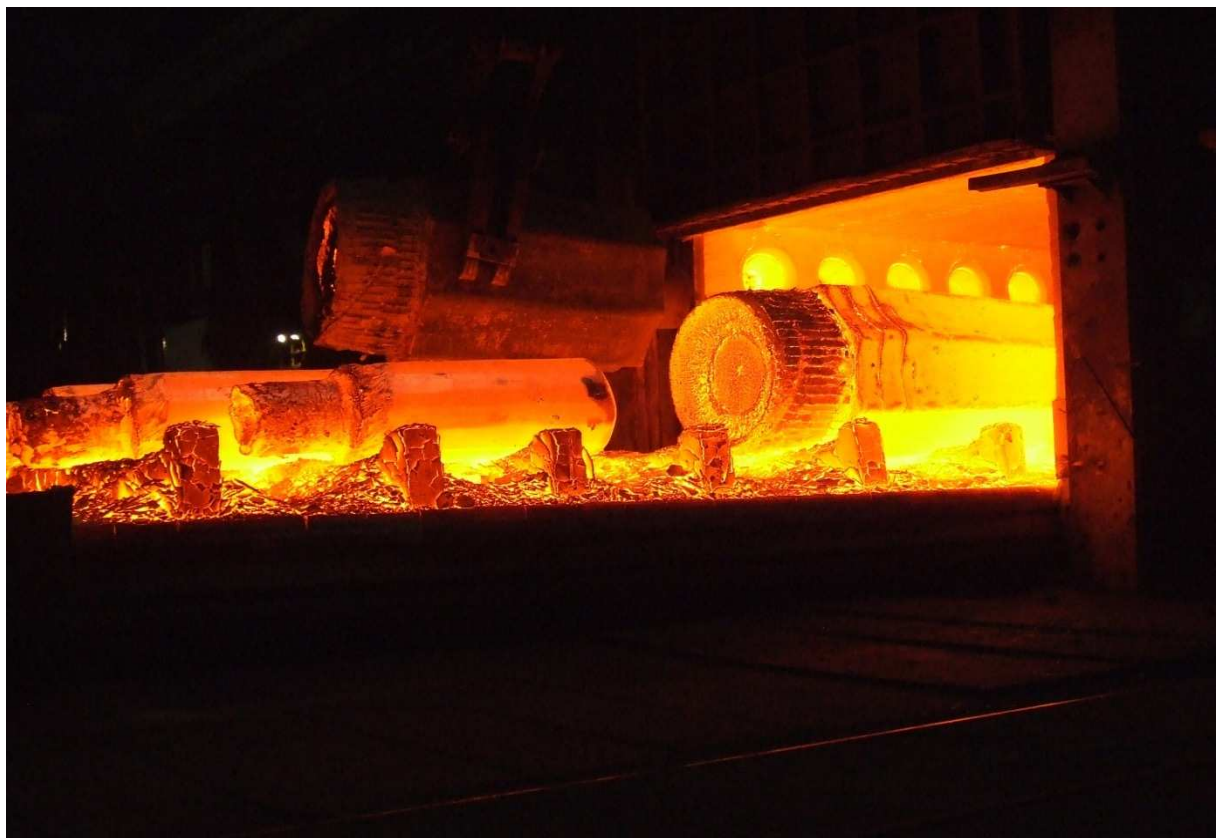
2.2.2 Rozložení vsázky v peci ve společnosti Pilsen steel

Při sázení ingotu do pece (obr. 11) nelze přesně definovat pravidla, podle kterých dochází k nasazování do pece. Zpravidla se vychází ze zkušeností a znalostí daného technologa. Pro různé materiály se využívá různých postupů ohřevů (nizkolegované x vysokolegované oceli). V různých oblastech pece mohou být rozdílné teploty (špatná izolace) atd. Lze určit několik základních zásad, podle kterých se sázení do pece provádí:

- Teplota ingotu by měla být minimálně 650°C (v případě ohřevu teplého ingotu),
- Čas od příjezdu ingotu z ocelárny do kovářny po nasazení do pece by měl být co nejkratší, tak aby nedošlo k příliš velkému snížení teploty ingotu,
- Ingoty by měly být v peci rozloženy rovnoměrně, neměly by se dávat ingoty na sebe, neměly by být v přímém styku se stěnou pece, měla by být dodržena nosnost pece.

1a					
1b					
2					
3a					
3b					
4a					
4b					
5					

Obr. 10 Uložení materiálu v pecním prostoru [4]



Obr. 11 Ukázka rozložení v peci ve společnosti Pilsen steel [22]

3. Stanovení možného vlivu technologické nekázně na průběh a výsledek ohřevu – podchycení hlavních faktorů, vytvoření numerického modelu

Cílem této diplomové práce bylo stanovit vliv sálání pecní vyzdívky na vsázku ingotů. Snahou bylo sestavit co nejrealnější počáteční podmínky pro simulaci ohřevu ingotů v peci tak, aby se výsledný výpočet co nejvíce blížil skutečnému provozu. Sledování probíhalo po dobu cca. 2 měsíců ve společnosti PS v provozu kovárna. Byly sledovány teploty ingotů, pecí, časy převozů, sledovalo se rozložení vsázek v pecích atd. Sledování probíhalo v peci Loi1 (viz dále). Následně byla sestavena statistika, ve které se sledovaly především druhy ingotů, jejich poloha v peci, teplota ingotů a pece. Následně byl sestaven výsledný model, který ukazuje rozložení ingotu v peci, teplotu sledovaného ingotu a teplotu pece. Během pozorování byl sledován i vliv technologické nekázně a to, zda byly dodržovány směrnice, podle kterých se řídí ohřev ingotů. Především se sledovala teplota ingotů, které byly nasazeny do pece tak aby splňovaly definici „teplého ingotu“.

V této kapitole budou nejprve popsány zásady ohřevu. Poté jakým způsobem byla vytvořena statistika a výsledný model.

3.1 Hlavní faktory ohřevu

3.1.1 Režim ohřevu

Ohřev ingotu na kovací teplotu je velmi náročný. Významnou částí ovlivňuje konečnou jakost materiálu. Existuje riziko vzniku trhlin z nadměrného pnutí při velmi rychlém ohřevu. V současné době jsou užívané režimy ohřevů stanoveny pouze empiricky (v krajních případech matematickými výpočty). Mezi důležité činitele ohřevu patří [10]:

- Konečná teplota kovů (kovací teplota) – je daná vlastnostmi materiálu. Zvýšená teplota ohřevu má příznivé důsledky při jejím zpracování. Může však dojít k růstu zrna, nebo dochází k přehřátí hranic zrn a k intenzívnější oxidaci.
- Dovolená rychlost ohřevu – rychlost ohřevu musí vyhovovat nejen z hlediska ekonomických (čím pomalejší ohřev, tím větší spotřeba energie). Na druhé straně příliš velká rychlost ohřevu vede k nadměrnému pnutí uvnitř ingotu a tím i ke vzniku deformací, které vyústí až ve vznik trhlin. Nejen příliš vysoká teplota, ale i příliš rychlý ohřev může vést k přehřátí, potažmo spálení materiálu. Po ohřevu na kovací teplotu následuje výdrž na této teplotě (výdrž na teplotě se řídí druhem materiálu i velikostí ohřívané části).

Lze říci, že ohřev kovů patří k nejsložitějším technologickým problémům. Jak již bylo řečeno v kapitole 1.1.1.5, zahrnuje nejen sdílení tepla vně ohříváného kovu (přestup tepla ze spalín na povrch kovu za působení pecního zdiva), ale i šíření uvnitř ohříváného materiálu [4,10]:

3.1.2 Režim ohřevu v PS

V současné době užívané ohřevy jsou stanoveny obvykle jen empiricky na základě dlouholetých zkušeností technologů a jsou určeny směrnicí „Ohřev a mezi ohřev ingotů

a rozkovaných výkovků v provozu kovárna.“ Ve směrnici jsou rozděleny způsoby ohřevů do tří skupin podle náchylnosti ke vzniku pnutíových trhlin a podle třídy kovatelnosti. Třída kovatelnosti udává stupeň obtížnosti kování rozdělených do čtyř tříd (podle přetvárného odporu, náchylnosti ke zpevňování, výskytu dvoufázových struktur, karbidických fází atd.) Poměr mezi jednotlivými třídami kovatelnosti je vyjádřen procentuálním zhoršením kovatelnosti jednotlivých tříd oproti třídě I (viz tab. 2). V tabulce 3 jsou uvedeny příklady předepsaných kovací teplot (maximální a minimální teplota), skupiny ohřevu a třídy kovatelnosti [9].

Třída kovatelnosti	I	II	III	IV
Ingoty	0	20	40	100

Tabulka 2. Třídy kovatelnosti jednotlivých tříd oproti třídě I.

Značka oceli	Kovací teplota [°C]	Skupina ohřevu	Třída kovatelnosti
C45	1180-800	I	I
C60	1150-800	II	I
18CrNiMo7-6	1150-800	III	I
34CrNiMo6	1180-800	II	I
S355J2	1150-800	I	I
X17CrNi16-2	1150-900	III	III

Tabulka 3. Předepsané kovací teploty, skupiny ohřevu a třída kovatelnosti pro jednotlivé značky oceli

3.1.2.1 Způsob ohřevu

Způsob ohřevů se odlišuje podle toho, o jaké ingoty se jedná:

1. Ohřev teplých ingotů
2. Ohřev poloteplých ingotů
3. Ohřev studených ingotů

Ad1) Ohřev teplých ingotů:

Teplé ingoty se sázejí přímo na pec vytopenou na kovací teplotu a ohřívají se během výdrže. Minimální hodnoty uvádí tabulka 4., ve které jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé příklady ingotů [9]:

Ingot	Minimální doba výdrže na kovací teplotě [hod]			Max. doba výdrže na kovací teplotě [hod]
	Skupina ohřevu			Pro všechny skupiny
	I	II	III	
I 5.7	4	7	10	34
I 20	11	14	18	53
I 70	21	26	30	80
I 110	27	32	38	100
I 170	40	45	51	125

Tabulka 4. Ohřev teplých ingotů [9]

Ad2) Ohřev poloteplých ingotů:

Poloteplé ingoty se v závislosti na rozměru a druhu materiálu buď sázejí přímo na pec vytopenou na kovací teplotu a ohřívají se během této výdrže, nebo se sázejí na pec vytopenou na 700°C a po předepsané výdrži se buď přesadí na pec vytopenou na kovací teplotu, nebo se v téže peci ohřívají rychlostí max. 100°C/hod na kovací teplotu a poté se ohřívají během této výdrže. Hodnoty výdrží jsou stejné jako v tabulce číslo 4. Doby případných předehřevů na 700 °C jsou uvedeny v tabulce 5 [9].

Ingot	Minimální doba výdrže na kovací teplotě [hod]		
	Skupina ohřevu		
	I	II	III
I 5.7	0	2	8
I 20	2	8	16

I 70	10	15	27
I 110	13	18	36
I 170	20	21	44

Tabulka 5. Doby předehřevů na 700 °C.

Ad3) Ohřev studených ingotů:

Při ohřevu studených ingotů je důležitá:

- Skupina ohřevu
- Formát ingotu
- Maximální teplota pece při zakládání

Z toho se pak odvíjí:

- Náhřev na teplotu 650°C
- Výdrž na této teplotě
- Náhřev na kovací teplotu
- Výdrž na kovací teplotě
- Celková doba náhřevu

3.2 Statistika reálného ohřevu

Jak již bylo řečeno, po odlití, ztuhnutí a stripování je ingot převezen z provozu ocelárna do provozu kovárna. Když dojde k odklopení termoboxu, je zaznamenána teplota ingotu pracovníkem technické kontroly na třech místech, a to u hlavy, na těle a u pudy ingotu. Pracovník je dále povinen zapsat čas, kdy byl ingot přivezen do kovárny. Hodnoty jsou zaznamenány a ingot je převezen pomocí jeřábu k peci. Dojde k otevření pece a po opadnutí teplotního oparu je změřena teplota pece na třech místech (vpředu, ve středu a vzadu). Poté vyjde k vyjetí vozu a uložení ingotu do pece. Zaznamená se poloha ingotu a čas, kdy byl ingot nasazen do pece. Toto se opakuje pro každý ingot, který je dovezen do provozu kovárny a určen pro ohřev na kovací teplotu a následně ke kování.

V této kapitole bude shrnuto veškeré sledování, které bylo prováděno ve společnosti PS. Bude zde popsáno, jakým způsobem byl vytvořen výpočtový model, jak došlo k výběru ingotů, materiálu ingotů, teplot pecí a ingotů. Dále budou popsány základní charakteristiky pece.

3.2.1 Vytvoření statistiky a následně sestavení modelu

Měření probíhalo v kovářské vozové peci Loi1 (viz obr. 12). Tato pec se používá pro ohřev ingotů a výkovků v PS. Základní parametry pece jsou uvedeny níže.



Obr. 12 Pec Loi1 [22]

Parametry pece:

- Způsob vytápění – tato pec má 9 plynových hořáků nahoře a dole na každé straně
- Max. teplota – 1200°C
- Max. hmotnost – 400 t
- Rozměry pece – 6900 x 13000 mm
- Rozměry vozu – 5900 x 13000 mm
- Vyzdívka – sibrál

Postup vytvoření výpočtového modelu:

1. Sběr informací
2. Výběr ingotů
3. Výběr materiálů ingotů
4. Určení teploty ingotu I 45 VNH (bude věnována samostatná kapitola)
5. Určení teploty pece
6. Sestavení ingotů v peci
7. Vytvoření výpočtového modelu

Ad1) Sběr informací:

Při sběru informací bylo vycházeno ze záznamů technické kontroly (TK) v PS. Pracovníci zaznamenávají každý došlý ingot do knihy (zde se zaznamenávají čísla taveb, typ ingotu, čas naložení do pece, teplota pece a zakreslí se poloha ingotu v peci). Dále se údaje zaznamenávají do informačního systému (zde se kromě již zmíněných záznamů zapisují teploty ingotů, materiál, časy odjezdu z ocelárny, příjezd do ocelárny a následné založení do pece). Všechny tyto hodnoty byly zpracovány do tabulek a sloužily jako podklady pro vytváření modelu. V průběhu sledování docházelo k lití pouze o víkendech, sledované období bylo rozděleno na jednotlivé týdny. Tabulka 6. ukazuje druhý týden měření. Těchto tabulek bylo vytvořeno osm a dále docházelo k jejich zpracování.

Ingot	Vsázka			Teploty Ingotů			Naložení				Založení			Datum
	materiál	tavba	nasazení	hlava	střed	půda	čas naložení	odjezd	příjezd	čas převozu	čas založení	teplota pece	čas celkem	
I 20 V1NH	42CrMo4	24158	23:28	630	607	562	21:55	22:35	22:50	55	23:28	1150	1:33	2. týden
I 55 NNHN	34CrNiMo6	24155	0:50	675	642	571	23:50	23:55	0:08	18	0:50	1150	1:00	
I 30 VNH	42CrMo6	24158	1:18	678	624	583	1:18	0:47	0:57	27	1:18	1150	0:48	
I 70 NH	34CrNiMo6	24161	16:40	711	692	584	16:05	16:20	16:25	20	16:40	1150	0:35	
I 70 NH	34CrNiMo6	24162	19:25	695	662	565	19:02	19:04	19:05	3	19:25	1150	0:23	
I 40 VNH	6Cr3MoV	24160	7:28	673	664	581	7:01	7:20	7:28	27	7:45	940	0:44	

Tabulka 6. Hodnoty ingotů za dané sledované období

Ad2) Výběr ingotů:

Prvním krokem bylo stanovit (z tabulek, které byly vytvořeny v předešlém kroku), z jakých typů ingotů bude sestaven model. Postup byl takový, že byly nejprve vypsány všechny ingoty (včetně četnosti), které za dané období byly nasazeny do pece (tab. 7) a následně bylo dle četnosti sestaveno pořadí ingotů (tab. 8). Z tohoto pořadí bylo následně vybráno 8 ingotů, které byly použity pro sestavení modelu.

I 45 VNH	3
I 25 VNH	7
I 20 V1NH	1
I 20 V2NH	1
I 25 NH	10
I 40 NH	3
I 40 VNH	6
I 55 NNHN	3
I 55 VNH	2
I 70 NH	7
I 70 NHN1	1
I 70 VNH	2
I 85 NH	1

Tabulka 7. Ingoty nasazené do pece za sledované období

I 25 NH	10
I 25 VNH	7
I 70 NH	7
I 40 VNH	6
I 40 NH	3
I 45 VNH	3
I 55 NNHN	3
I 70 VNH	2
I 55VNH	2
I 20 V1NH	1
I 20 V2NH	1
I 70 NHN1	1
I 85 NH	1

Tabulka 8. Pořadí ingotů dle četnosti

Ad3) Výběr materiálu:

Poté co byly vybrány nejčastější typy ingotů, byly k těmto ingotům přiřazeny nejčastější materiály, ze kterých byly dané ingoty odlity. Následně bylo určeno, kolikrát byl daný ingot odlit z konkrétního materiálu (viz tab. 9). Z tabulky vyplývá, že nejčastějšími materiály jsou středně legovaná ocel 34CrNiMo6, nízkolegovaná ocel 42CrMo4 a uhlíková ocel C45+N. Jedná se o standardní oceli, které se používají pro kování ve společnosti PS.

Ingoty	Material					
	34CrNiMo6	42CrMo4	C45+N	ASTM A668	C35+N	6Cr3MoV
I 25 NH	8				2	
I 25 VNH	7					
I 70 NH	4		1	2		
I 40 VNH			5			1
I 40 NH	2	1				
I 45 VNH		3				
I 55 NNHN	2					1
I 70 VNH	2					

Tabulka 9. Výběr materiálů

Ad4) Určení teploty pece:

Při určování teploty pece byly vzaty teploty, které byly naměřeny při vstupu ingotů do pece. Teploty byly brány z již vybraných ingotů. Tabulka 10. ukazuje teploty pece, které byly naměřeny, konkrétní ingoty a kolikrát byl ingot nasazen při dané teplotě. Z tabulky vyplývá, že nejčastější teplotou byla teplota 1150°C, a to konkrétně čtrnáctkrát. Proto byla tato teplota vybrána jako referenční teplota pece.

Ingoty	Teploty [°C]					
	880	1000	1050	1100	1150	1200
I 25 NH	3				4	3
I 25 VNH		2		3	2	
I 70 NH		1		1	4	1
I 40 VNH	2	2			2	
I 40 NH				2	1	
I 45 VNH			2		1	
I 55 NNHN		2		1		
I 70 VNH			2			
Suma	5	7	4	7	14	4

Obr. 10. Stanovení teploty pece

Ad5) Sestavení vsázky v peci:

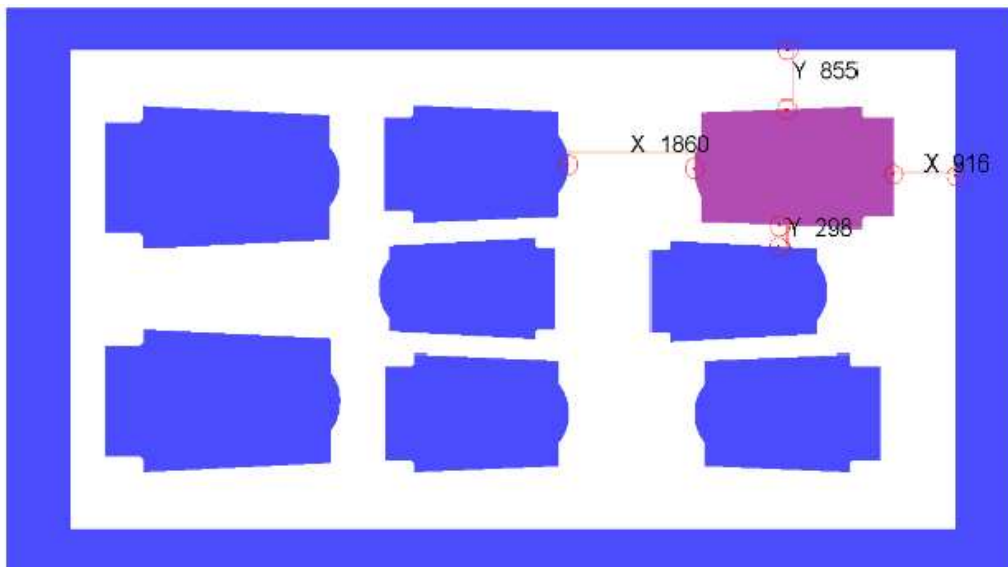
Posledním krokem před vytvořením modelu bylo určit polohu ingotů v peci. Postup byl takový, že se opět vzaly ingoty, které již byly vybrány v předchozích krocích. Poté byla určena jejich nejčastější poloha (viz tab. 11). Nejprve se jednotlivé ingoty umístily na konkrétní místo dle podkladu (náčrt rozložení ingotů v peci). Určilo se, kolikrát byl daný ingot na konkrétním místě. Jelikož sledování probíhalo několik týdnů, na jednotlivých místech mohlo být více ingotů. Jestliže tato situace nastala, bral se ingot, který byl na daném místě častěji. Z tabulky plyne, že v zadní části pece se nejčastěji objevovaly ingoty I 70 NH. Ve střední části zprava doleva to byly ingoty I 40 VNH, I 25 NH a I 40 VNH. V přední části je na levé straně ingot I 40 VNH, uprostřed I 25 VNH a na pravé straně ingot I 45 VNH. Ingot I 45 VNH bude podrobněji probrán v další kapitole 4.3.

Určení sestavení ingotů v sázce									
Ingot	přední část			střední část			zadní část		
	Leva strana	Střed	Prava strana	Leva strana	Střed	Prava strana	Leva strana	Střed	Prava strana
I 25 NH	1			1	4		2		2
I 25 VNH		4	3	1			1		1
I 70 NH							4		3
I 40 VNH	2			2		2			
I 40 NH			1				1		1
I 45 VNH		2	1						
I 55 NNHN							1		2
I 70 VNH						1	1		

Tabulka 11. Stanovení rozložení vsázky v peci

ad6) Vytvoření výpočtového modelu:

Posledním krokem této kapitoly bylo vytvoření modelu. Tento model vyplývá z předešlých kroků (viz obr. 13). Na obrázku třináctém je vidět rozložení ingotů v peci. V zadní části jsou dva ingoty I 70 NH z materiálu 34CrNiMo6. Ve střední části jsou ingoty I 40 VNH z C45+N a ingot I 25 NH z materiálu 34CrNiMo6. Konečně v přední části jsou ingoty I 45 VNH jeden z materiálu 42CrMo4, druhý z 34CrNiMo6 a dále ingot I 25 VNH z materiálu 34CrNiMo6. Ingoty jsou od stěny vzdálené minimálně 800 mm. Pec i ingoty mají reálné rozměry dle výkresové dokumentace, která byla poskytnuta společností PS.



Obr. 13 Výpočtový model

4. Numerická analýza komplexních vsázek ingotů a jejich porovnání z hlediska působení radiálního tepla

Tato kapitola je nejprve věnována stručné teorii metody konečných prvků. Se zaměřením na tepelné úlohy. Bude zde stručně popsán vybraný software, ve kterém probíhal výpočet. Především však nastavení podmínek simulace, tj. vytvoření materiálových dat pro ocel 34CrNiMo6 a následně teplotního pole v ingotu. Posléze nastavení samotného výpočtu.

4.1 Typy teplotních úloh a teorie metody konečných prvků

Tepelné úlohy lze rozdělit do čtyř základních skupin, které se liší charakterem a algoritmem řešení. Jsou to úlohy přímé, nepřímé, identifikační a optimalizační [19].

Přímé úlohy:

Při řešení přímých úloh se hledá vnitřní reakce tepelného systému na vnější podnět vyvolaný okrajovou podmínkou a počátečním stavem systému, který je dán počáteční podmínkou. Výsledkem řešení je určení teploty nebo teplotního pole pro zadané podmínky jednoznačnosti. Tyto úlohy převažují při řešení tepelných systémů obecně. Řešením těchto úloh je analýza tepelného systému vyvolaného podnětem (okrajovou podmínkou), namísto řízení tepelného systému. Přímé úlohy můžeme dělit dále na úlohy stacionární, nestacionární, lineární, nelineární, úlohy s různými okrajovými podmínkami, úlohy s fázovými přeměnami, s pohyby hranic, s vnitřními zdroji tepla apod. [19].

Nepřímá úloha:

Je formulována tak, že pro předem známé chování tepelného systému se hledá odpovídající vnější nebo vnitřní reakce. Určuje se tedy okrajová podmínka, tepelně-fyzikální parametry, tepelný tok, nebo tvar systému. Vnější (okrajovou) nepřímou úlohou nazýváme úlohu, hledá-li se okrajová podmínka, tepelný tok, součinitel přestupu tepla. Vnitřní (parametrickou) úlohou nazýváme úlohu, při níž hledáme tepelně fyzikální parametry (λ , c , a). Při tvarově nepřímé úloze hledáme variační oblasti. Hledá-li se počáteční podmínka, pak se jedná o počáteční nepřímou úlohu [19].

Identifikační metody:

Určují nebo častěji zpřesňují matematický model tepelného systému. Při řešení se hledají výstupní odezvy tepelného systému na odpovídající podněty, přičemž vnitřní chování tepelného systému se nezkoumá. Tepelný systém představuje „černou skříňku“, u níž se řeší tepelný přenos mezi vstupem s výstupem [19].

Optimalizační úlohy:

Jsou zaměřeny na řešení různých druhů optimalizace tepelného procesu nebo tepelného systému. Hledají se nové podmínky (i okrajové), při nichž jsou splněny zadané podmínky optimalizace. U těchto metod se poté zadávají tzv. omezující podmínky (např. maximální teplota, rychlost ohřevu, apod.), které jsou dány charakterem řešené úlohy dle tepelného

systému. Například ohřev materiálu je typickou úlohou optimálního řízení tepelného procesu. Kromě omezujících podmínek jsou zde ještě další požadavky – minimální doba ohřevu či minimální spotřeba energie, což je důležité pro ekonomiku tepelných procesů obecně [19].

Pro řešení těchto úloh se používá celá řada metod jak analytických tak numerických. Jednou z nejvíce používaných numerických metod je metoda konečných prvků.

Metoda konečných prvků (Finite element method – FEM) je obecná numerická metoda, která může být využita k řešení celé řady úloh. Kromě problematiky mechaniky (statika, dynamika pevných látek) se také běžně používá pro modelování proudění tekutin, pro vedení tepla, k analýze elektromagnetických polí atd. Výhoda této metody spočívá zejména v její poměrně velké univerzálnosti a schopnosti popsat značně komplikované a rozsáhlé problémy. Metoda je velmi snadno algoritmizovatelná [11]. K rozšíření této metody došlo s boomem počítačů a nárůstem jejich výpočetního výkonu.

Základní myšlenkou FEM je rozložení na menší části – elementy, tedy konečné prvky, na kterých je posléze analýza chování poměrně jednoduchá. Např. v deformační variantě, která je nejrozšířenější, se vychází z nahrazení posuvů náhradními funkcemi. Tyto funkce se berou ve tvaru polynomů prostorových souřadnic. Celý postup metody konečných prvků se dá vyjádřit v několika krocích [12,13]:

- Generace sítě prvků s uzly (rozdělení řešené oblasti na konečné prvky či elementy),
- Aproximace potenciálů na jednotlivých prvcích z uzlových bodů,
- Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové body,
- Vyřešení soustavy – získání primárních neznámých,
- Získání dodatečných (odvozených) výsledků.

Obecný postup tvorby výpočtu (simulace):

Softwary založené na numerických výpočtech se obecně skládají ze tří základních částí:

- Preprocessing – kde se vytváří vstupní data
- Processing – kde se provádí vlastní výpočet
- Postprocessing – který slouží pro zobrazování a vyhodnocování výsledků

Softwary založené na principu metody konečných prvků:

Na trhu je celá řada softwarů, které lze využít pro výpočet pomocí metody konečných prvků. Mezi nejrozšířenější patří např. ANSYS, DEFORM, MSC, FORGE, FLUENT, CATIA atd.

ANSYS:

Programový balík založený na metodě konečných prvků je určen pro řešení lineárních i nelineárních (fyzikálně geometrických) úloh mnoha různých kategorií, a to např. strukturní napětí, teplotní, teplotně mechanické atd. Základními částmi tohoto programu jsou [14]:

- Preprocessor
- Solver
- Postprocessor

Výhody tohoto softwaru jsou:

- Podpora přímého importu geometrií a modelů přímo z CAD systémů (ProE, Unigraphics...),
- Možnost volby mezi h-Method a p-Method pro potřeby adaptace sítě,
- Program umožňuje řešit celou řadu sdružených úloh,
- Díky modulu Flotran lze řešit i úlohy proudění.

MSC:

Má celou řadu produktů mezi nejrozšířenější patří NASTRAN. Tento produkt je postaven na práci vědců a výzkumníků z NASA. Téměř každá kosmická loď, letadlo či jiné zařízení bylo v posledních 40 letech analyzováno pomocí tohoto produktu. MSC NASTRAN nabízí [15]:

- Komplexní sadu lineárně statických i dynamických analýz,
- Kompletní sadu implicitních a explicitních analýz,
- Teplotní analýzy,
- Propojení mezi jednotlivými oblastmi jako jsou např. teplotní, strukturní atd.

FLUENT:

je moderní CFD (Computational Fluid dynamics) program umožňující komplexní řešení úloh z oblasti proudění a spalování. Řešit je možno vnitřní i vnější obtékání, v laminární i turbulentní oblasti, výpočty vícefázového proudění, proudění s volnou hladinou i chemickými reakcemi (například hoření) spolu s přenosem tepla. Program umožňuje jak stacionární, tak i nestacionární analýzu 2D i 3D problémů a následnou kvalitní vizualizaci výsledků. FLUENT lze použít pro modelování složitých procesů v energetice, chemickém inženýrství a v technice životního prostředí [20].

CATIA:

je software pro 3D počítačové konstruování v oblastech CAD/CAM/CAE. Používá se v leteckém, lodním a automobilovém průmyslu, ale je rozšířený i do dalších oblastí – např. robotika. Je to software, který podporuje všechny stupně vývoje produktu od koncepce a konstrukce (CAD – computer-aided design), přes výrobu (CAM – computer-aided manufacturing) až po analýzy (CAE – computer-aided engineering). Je to software, který popíše daný výrobek od zadání koncepce, přes návrhy, tvorbu modelů, obrábění až po konečnou podobu [19].

4.2 Popis vybraného softwaru

Pro modelování (simulaci) přestupu tepla v peci byl zvolen inženýrský simulační balík DEFORM - 2D verze 10.0 (viz obr. 14) pracující na principu metody konečných prvků. Tento systém je navržen tak, aby byl schopen analyzovat různé tvářecí a tepelné procesy. Software je používán v celé řadě průmyslových odvětví, od automobilového, přes lodní až po letecký průmysl. Deform - 2D byl vybrán z toho důvodu, že dokáže simulovat přestup tepla radiací, konvekcí i vlastní kondukcí v materiálu, což je pro tuto diplomovou práci zásadní. Deform -2D umožňuje mimo jiného, aby [16]:

- Snížili potřeby nákladných studií.
- Snížili náklady na tvorbu nástrojů pro tvářecí.
- Snížili dodací lhůty uvedení nového výrobku na trh



Obr. 14 Titulní obrazovka systému deform – 2D verze 10.0

Deform má velice přívětivé grafické uživatelské prostředí umožňující snadnou přípravu a analýzu dat, takže se inženýři mohou soustředit na samotné tvářecí procesy a neztrácet čas s pochopením složitých počítačových systémů. Velkou výhodou tohoto programu je plně automatický optimalizovaný „remeshing“ systém pro velké deformace [16]. Deform nám umožňuje řešit dva základní procesy:

- Deformační
- Tepelné a chemicko-tepelné zpracování

Deformační – umožňuje např. [16]:

- Modelování tvářecích pochodů a zároveň přestupů tepel při ochlazování či ohřevu,
- Obsahuje rozsáhlou databázi materiálů (oceli, slitiny...),
- Poskytuje možnost definovat vstupní data u jakéhokoliv materiálu (pevnostní charakteristiky, koeficienty přestupů tepla...),
- Možno vložení vlastních vypočtených dat,
- Umožňuje řešení rigidních, elastických, elastoplastických a plastických těles,
- Umožňuje zobrazení grafů (teplot, napětí, deformací...).

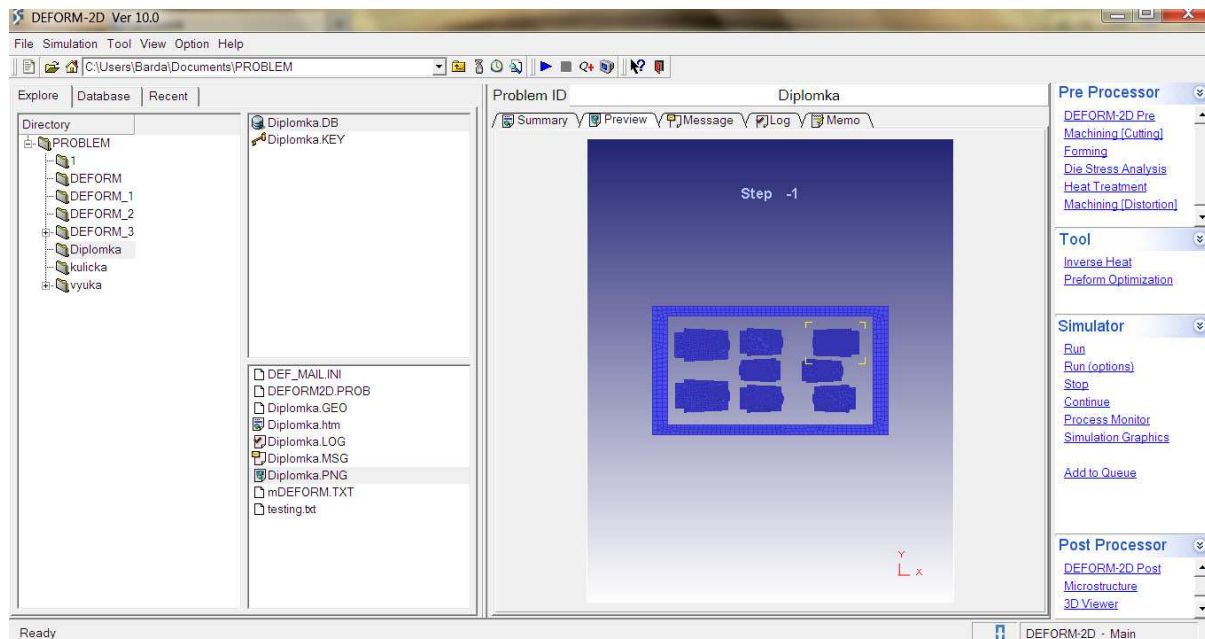
Tepelné zpracování – umožňuje modelování procesů, jako jsou [16]:

- Normalizační žíhání
- Kalení
- Popouštění
- Žíhání
- Cementaci

4.2.1 Základní části softwaru DEFORM

Při spuštění programu Deform - 2D se nám otevře přehledná úvodní obrazovka (obr. 15), kterou lze rozdělit na tři základní části. V levé části jsou jednotlivé problémy rozděleny do složek. Složky obsahují jak samotné nastavené výpočty (soubory s koncovkou KEY), tak již vypočtené databáze (soubory s koncovkou DB). Ve střední části obrazovky můžeme vidět náhled na daný řešený problém a dále zde máme záložky, které nám umožňují například sledovat průběh simulace (Message), nebo výsledné hodnocení dané simulace (Summary) atd. V pravé části, tedy úvodním zobrazení, jsou tři základní části programu. Tou první je „Preprocessor“, kde dochází k nastavení samotné simulace a nastavení průběhu simulace. Posléze zde dochází k vygenerování samotné databáze. Dále část „Simulator“, kde probíhá vlastní výpočet databáze. Zde lze sledovat pomocí „Simulation graphics“ průběh výpočtu. Dále je zde možnost ukončit samotný výpočet, popřípadě pokračovat ve výpočtu, který byl přerušen. Poslední částí je Postprocessor, kde dochází k analýze vypočtené databáze.

V horní liště úvodní obrazovky jsou rozloženy základní ovládací prvky programu. Jedná se například o založení nového problému, otevření již uloženého problému atd. Lze zde ovládat i průběh samotné simulace.



Obr. 15 Úvodní obrazovka Deform - 2D

Jak již bylo řečeno, struktura programu je složena ze třech základních částí:

1. Preprocessor
2. Simulator
3. Postprocessor

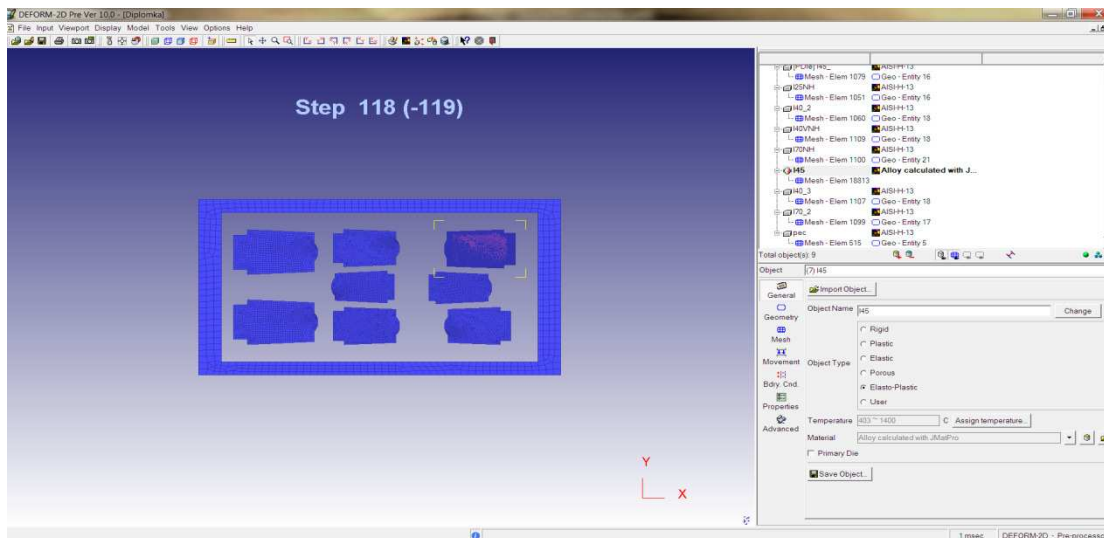
Ad1) Preprocessor:

Při spuštění Preprocessoru (obr. 16) dojde k otevření okna, které můžeme rozdělit na tři části. V levé části lze vidět náhled řešeného problému a v pravé části v horních partiích je nastavení jednotlivých částí modelu, které byly nastaveny (materiál, síť, geometrie). Lze zde jednotlivé objekty přidávat, odebírat atd. V dolní části je samotné nastavení jednotlivých objektů obsahující „General“ (hlavní nastavení), „Geometry“ (nastavení geometrie), „Mesh“ (nastavení sítě), „Movement“ (nastavení pohybů), „Bdry. Cnd.“ (nastavení počátečních podmínek – teploty, síly, pohyby atd.), „Properties“ (vlastnosti procesů – deformační, teplotní atd.) a „Advanced“ (možnost pokročilého nastavení). V horní liště, jsou pak ovládací prvky preprocessoru.

Tento modul slouží obecně k nastavení podmínek simulace, lze zde nastavit [16]:

- Object description (popis objektu) – obsahuje nastavení geometrie, sítě, teploty materiálu atd.,
- Material data (materiálová data) – popisuje chování materiálu za podmínek, které nastavíme během deformace,
- Inter object conditons (vstupní podmínky objektu) – popisuje, jak na sebe jednotlivé objekty působí (tření, přenos tepla...),
- Simulation kontrol (řízení simulace) – popisuje podmínky simulace, jak bude daná simulace probíhat (prostředí, teploty, počet kroků, okrajové podmínky atd.),

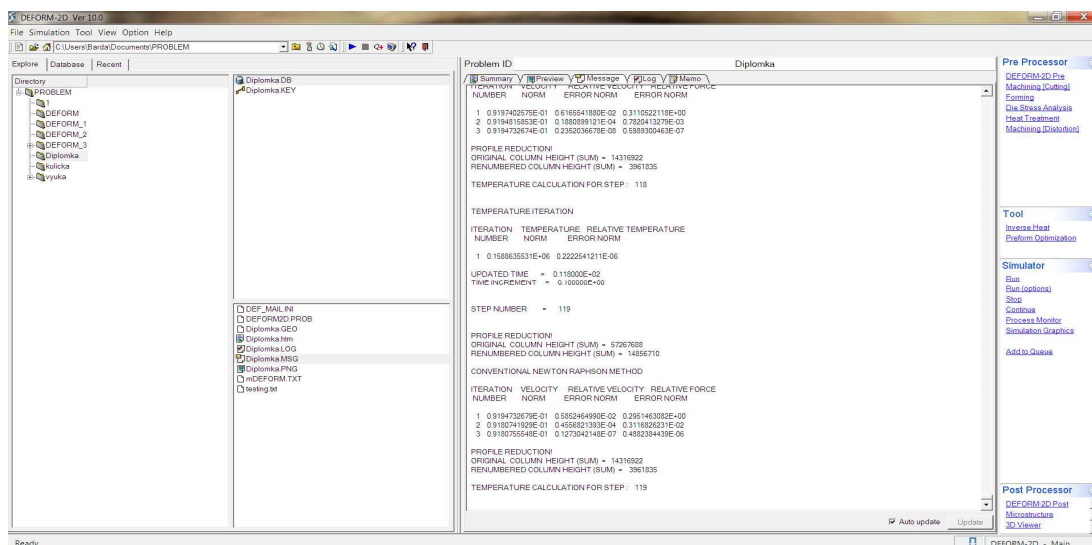
- Inter material date (vstupní data materiálu) – popisuje fyzikální proces jedné fáze materiálu transformovaného do další fáze stejného materiálu při procesu tepelného zpracování (austenit – perlit, bainit, martenzit atd.).



Obr. 16 Preprocessor

Ad2) Run simulation:

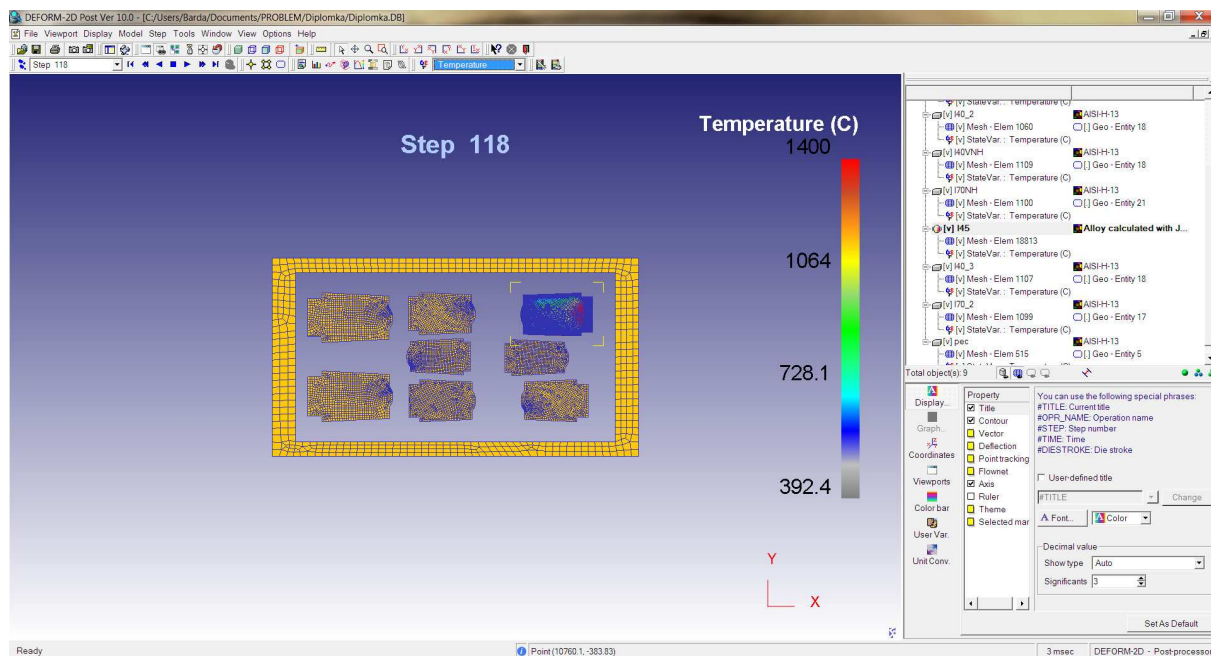
Tento modul (obr. 17) slouží k výpočtu samotné databáze, která byla nastavena v předchozích krocích. Při výpočtu je zobrazen čas a počet kroků, které již byly vypočteny, a dále výpis chyb. V případě zapnutí „Simulation Graphics“ lze sledovat průběh simulace (tzn. napětí, teploty...) Zobrazení v reálném čase má bezesporu výhodu v možnosti ovládní výpočtu databáze, kdy například při zřejmých chybách průběhu výpočtu není potřeba nechat jej proběhnout do okrajových podmínek zadaných pomocí Preprocessoru. Díky tomu je možné výpočet zastavit a ušetřit tím čas nutný pro opravu zadání.



Obr. 17 Run simulation

Ad3) Postprocessor:

Jedná se o grafický modul (obr. 18), který slouží k analýze vypočtené databáze. Obsahuje celou řadu možností, jakými lze vyhodnotit dané výsledky. Lze zobrazovat například rozložení teplot, napětí, deformací atd. pro každé jednotlivé kroky výpočtu. „Summary“ nám umožňuje výpis jednotlivých vlastností v krocích. Výsledky lze hodnotit pomocí grafů, funkce „Point tracking“ (umožňuje průběhy v jednotlivých bodech, které jsme zadali) atd. V horní liště jsou ovládací prvky Postprocessoru, kterými lze ovládat model (zvětšovat, zmenšovat, lokálně zvětšovat, různě natáčet, posouvat atd.). Ovládací prvek „State variables“ nám umožňuje zobrazení veličin pro analýzu výsledků výpočtu. Máme zde na výběr změnu měřítka, typu zobrazení pomocí vektorů, barevných ploch nebo čar. Dále je zde volba popisu hodnot apod. Pro výstup informací lze vytvořit snímky přímo z obrazovky, nebo lze hodnoty grafů exportovat do jiných programů jako je např. MS Excel. Lze též výsledky převádět do videí formátu AVI či WMV.



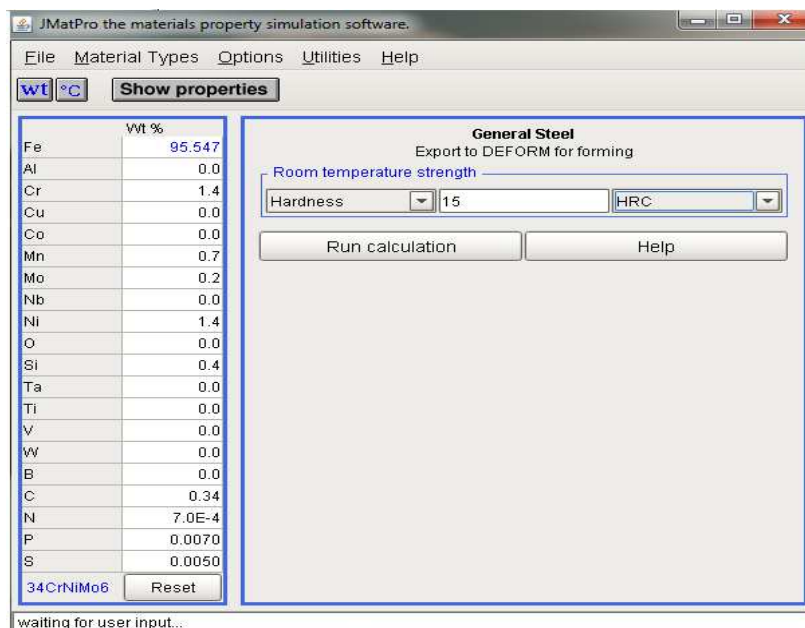
Obr. 18 Postprocessor

4.3 Nastavení vstupních dat simulace

Tato kapitola je věnována nastavení simulace před samotným výpočtem a následným podmínkám výpočtu. Snahou výpočtu bylo získat informace o tom, jakým způsobem dojde k ovlivnění ingotu při nasazení do pece vlivem sálání pecní vyzdívky a samotných ingotů, které jsou zahřátý na určitou teplotu. Pro výpočet byla uvažována pec a v ní 7 ingotů, které byly vybrány v kapitole 3.2.1. Byl přidán 8. ingot z oceli 34CrNiMo6, který měl vytvořené teplotní pole a na jeho povrchu byly sledovány teplotní a napěťové charakteristiky. U tohoto ingotu byly nejprve nastaveny zpřesněná materiálová data a až následně bylo vytvořeno teplotní pole. Poté byl sestaven model se všemi podmínkami a bylo možno přistoupit k nastavení podmínek výpočtu a posléze k vygenerování databáze a samotnému výpočtu.

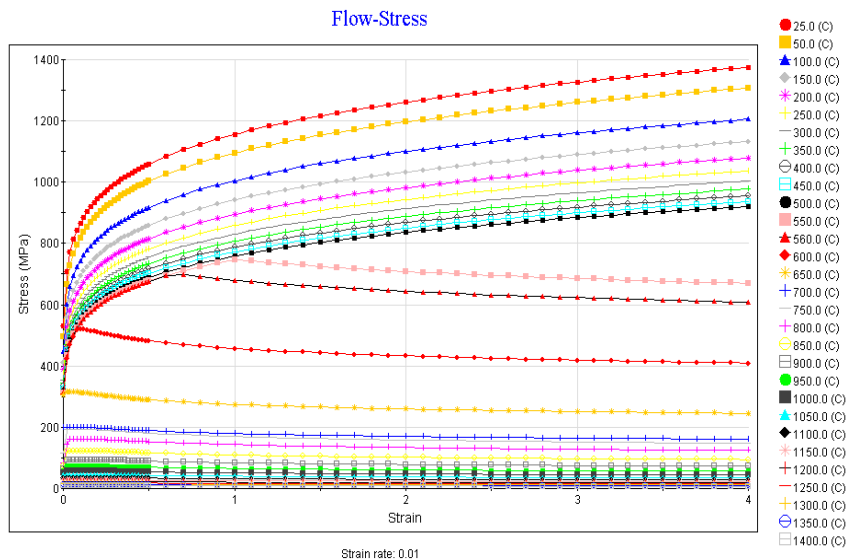
4.3.1 Zpřesnění dat materiálu 34CrNiMo6

Jako referenční ingot byl zvolen ingot I 45 VNH z materiálu 34CrNiMo6. Tento materiál však není obsažen v databázi materiálů softwaru Deform – 2D. Fyzikální nebo mechanické vlastnosti musely být získány jiným způsobem a posléze vloženy do databáze. Pro tento účel byl použit program JMatPro ve verzi 6.2. Tento program obsahuje širokou škálu vlastností materiálu a je schopen ze vstupních hodnot, jako jsou například chemické složení a tvrdost, dopočítat veškeré at' už mechanické (tahové křivky, napěťové charakteristiky atd.) nebo fyzikální vlastnosti (součinitelé tepelné vodivosti, radiační koeficienty atd.). Aby bylo možno získat potřebná data, muselo být nejprve zjištěno chemické složení a tvrdost ingotu po odlití a zchladnutí. Chemické složení bylo získáno dle metalurgického předpisu a tvrdost ingotu byla zjištěna od pracovníků technické kontroly v provozu ocelárny ve společnosti PS. Měření bylo provedeno na třech místech a poté proveden průměr. Naměřená tvrdost byla 15 HRC. Na obrázku 19. je zobrazeno, jakým způsobem se zadávají vstupní informace do programu JMatPro 6.2. Na obrázku je vidět zadané chemické složení a tvrdost HRC. Poté, co byly získány hodnoty z programu JMatPro, byly vloženy do databáze softwaru Deform – 2D.



Obr. 19 Zadávací okno programu JMatPro 6.2

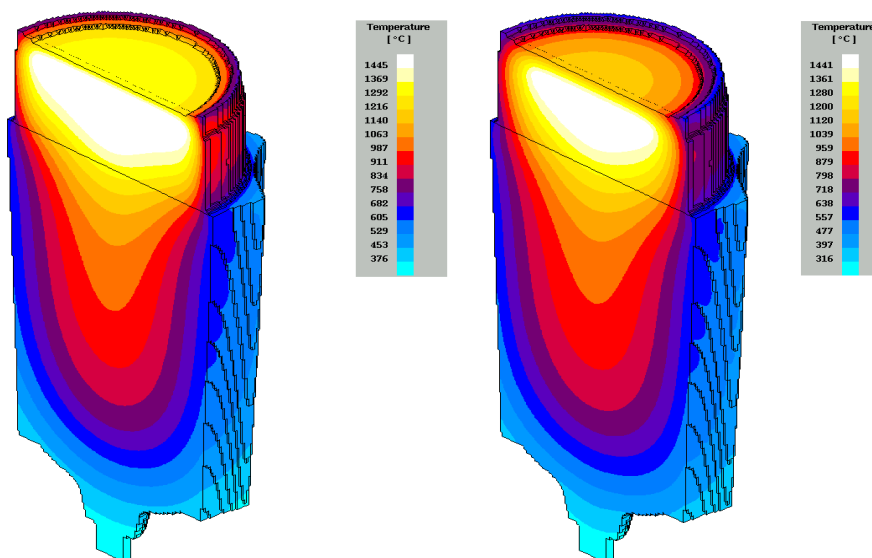
Na obrázku 20. jsou uvedeny příklady křivek meze kluzu pro daný materiál při různých teplotách, která byla vygenerována na základě vstupních hodnot do programu JMatPro 6.2.



Obr. 20 Křivky meze kluzu při různých teplotách

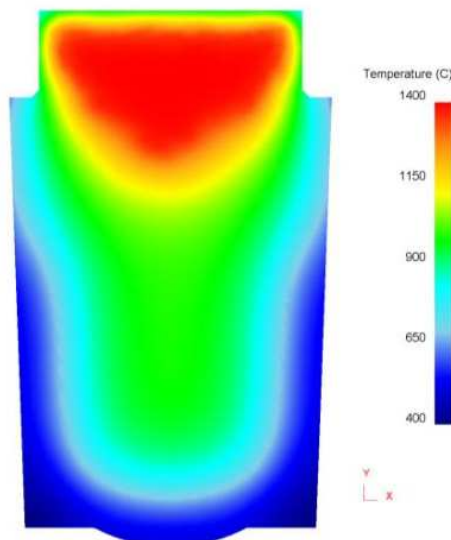
4.3.2 Vytvoření teplotního pole Ingotu I 45 VNH

Když byla získána zpřesněná data materiálu 34CrNiMo6, přistoupilo se k tvorbě teplotního pole v ingotu. Důvodem pro vytvoření teplotního pole byla větší přesnost výpočtu. Samotné vytvoření probíhalo v programu Deform – 2D. Aby bylo dosaženo co nejvíce reálného výpočtu, přistoupilo se k získání snímků skutečného teplotního pole ingotu. Jako podklad posloužily snímky z programu Magma (obr. 21), které byly poskytnuty společností PS. Na snímcích jsou vidět teplotní pole ingotů při ochlazování po 22 hod. (obr. vlevo) a po 23 hod. (obr. vpravo) před vlastním stripováním. Jsou vidět rozsahy teplot v daném ingotu.



Obr. 21 Teplotní pole vytvořené v Magma softwaru

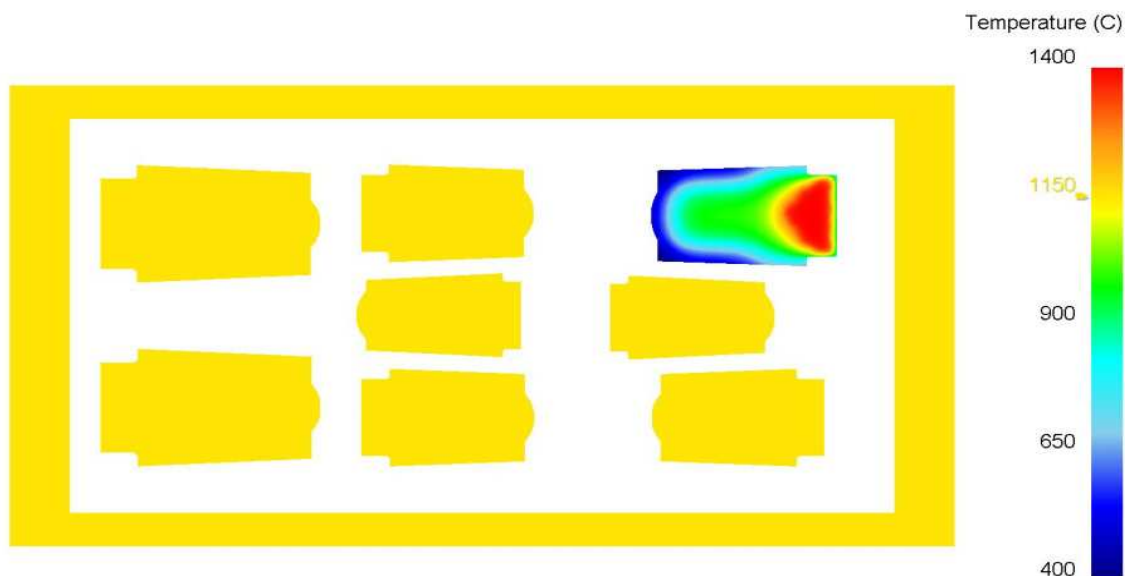
Na obrázku je patrné, že nejvyšší teploty jsou v hlavové části ingotu a ve středových partiích ingotu. Se znalostí vlastností materiálu a rozložení teplotního pole v ingotu bylo vytvořeno teplotní pole v ingotu I 45 VNH (viz obr 22.) Na snímku je vidět rozložení teplotního pole v ingotu. Toto teplotní pole bylo dále použito do modelu, viz kapitola 4.3.3.



Obr. 22 Teplotní pole ingotu I 45 VNH

4.3.3 Rozložení teploty v modelu

Na obrázku 23. můžeme vidět rozložení teploty na výpočtovém modelu, který byl vytvořen v kapitole 3.2.1 (obr 13.). Teplota pece a sedmi ingotů byla nastavena na 1150 °C (viz kapitola 3.2.1). Na obrázku je dále ingot I 45 VNH z materiálu 34CrNiMo6, ve kterém bylo vytvořeno teplotní pole (viz kapitola 4.3.2).



Obr. 23 Výpočtový model – rozložení teploty

4.3.4 Nastavení podmínek výpočtu v softwaru Deform - 2D

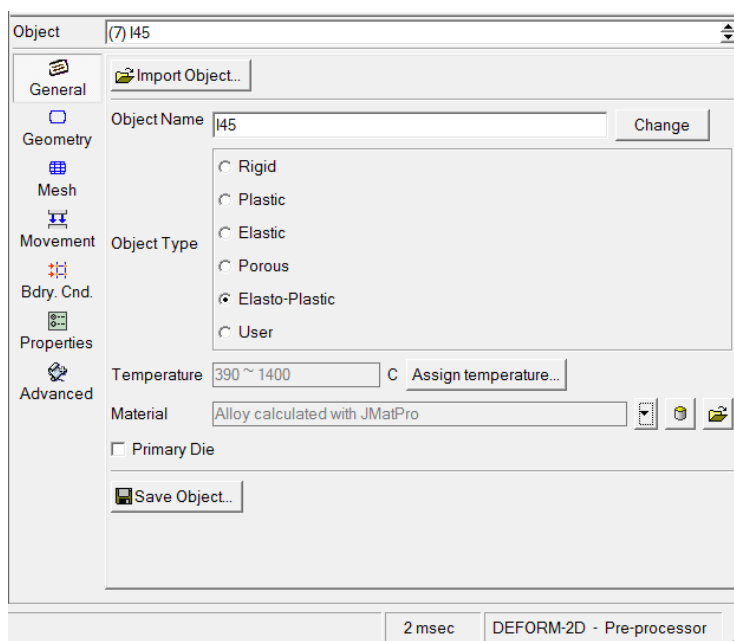
Abychom byli schopni provést výpočet, musíme nastavit všechny podmínky výpočtu. Toto se provádí v „Preprocesoru“. Posléze dojde k určení podmínek průběhu simulace „Simulation control“, následně k vytvoření databáze „Database generation“ a k samotnému výpočtu.

4.3.4.1 Nastavení Preprocesoru

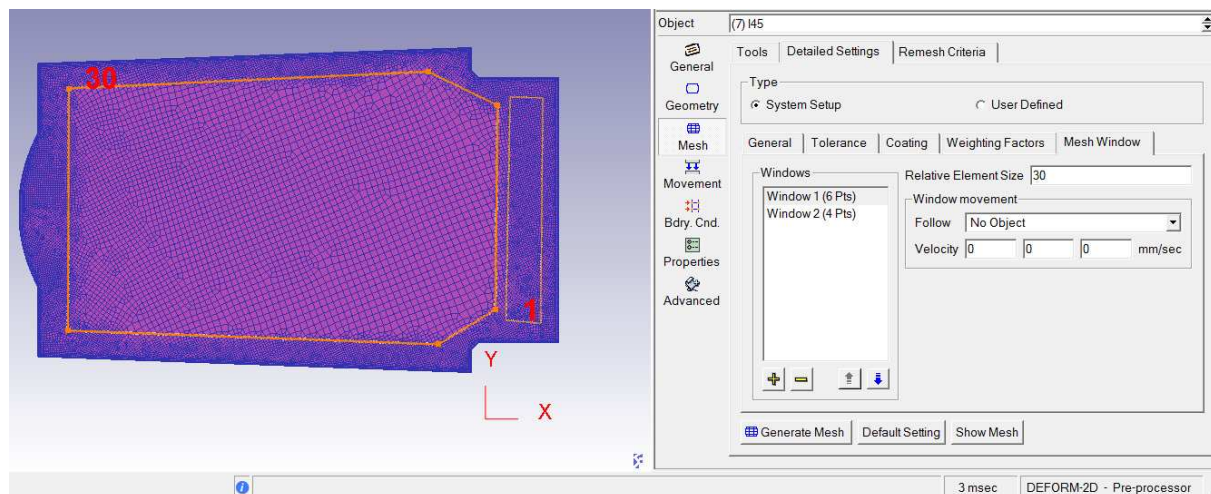
Jak již bylo popsáno v kapitole 4.2.1. Preprocesor slouží k nastavení výpočtu. V našem případě lze toto nastavení rozdělit na nastavení ingotu I 45 VNH a pece se zbylými ingoty.

Nastavení ingotu I 45 VNH pro výpočet:

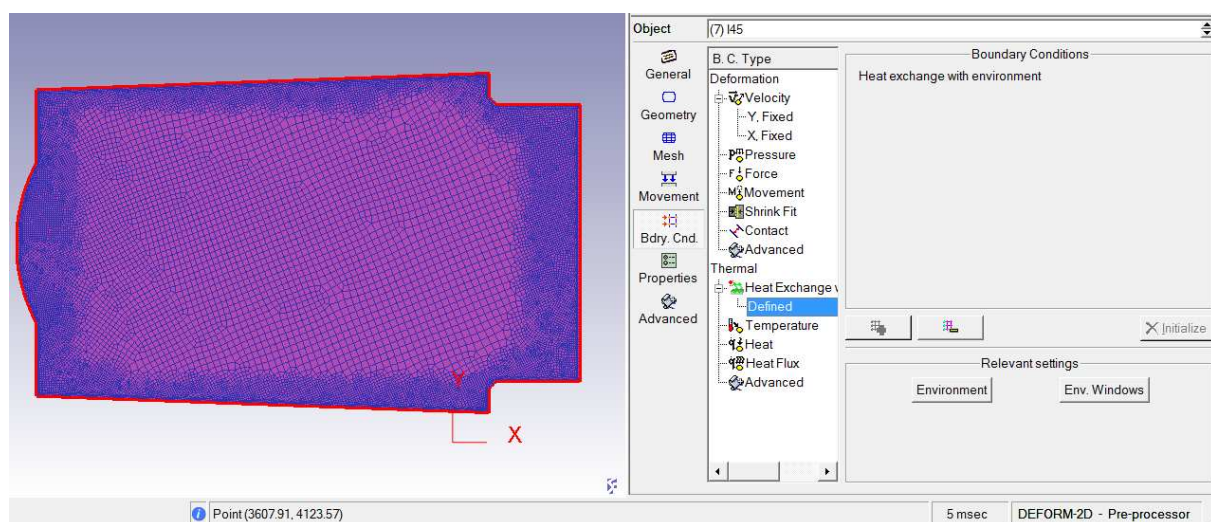
Na obrázku č. 24 můžeme vidět hlavní „general“ nastavení výpočtu. Pro výpočet byl uvažován materiál jako elasto-plastický. Materiál a jeho vlastnosti byly importovány z programu JMatPro a bylo nastaveno teplotní pole. Při řešení radiace je důležité zadat emisivitu, která byla zadána pro materiál 34CrNiMo6 0.70. Dalším krokem bylo importování geometrie (byla vytvořena pomocí pomocného grafického programu) a poté nastavení sítě „Mesh“ (viz obr. 25) na daném ingotu. Síť byla nastavena pomocí okna sítě „Mesh window“ pro lepší přesnost výpočtu. Posledním krokem bylo vytvoření počátečních podmínek „Bdry. Cnd.“, kde se provedlo zafixování ingotu tak, aby nedošlo k jeho pohybu vlivem působení teploty. Poté byla nastavena výměna tepla s okolím (viz obr. 26).



Obr. 24 Základní nastavení I 45 VNH



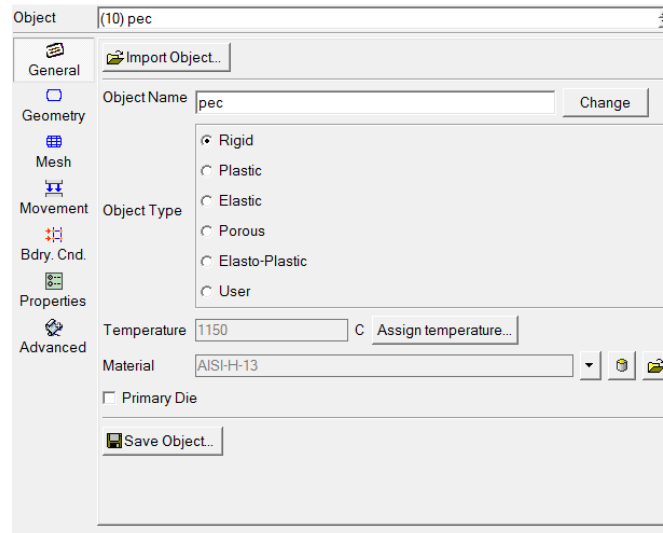
Obr. 25 Nastavení sítě



Obr. 26 Nastavení okrajových podmínek

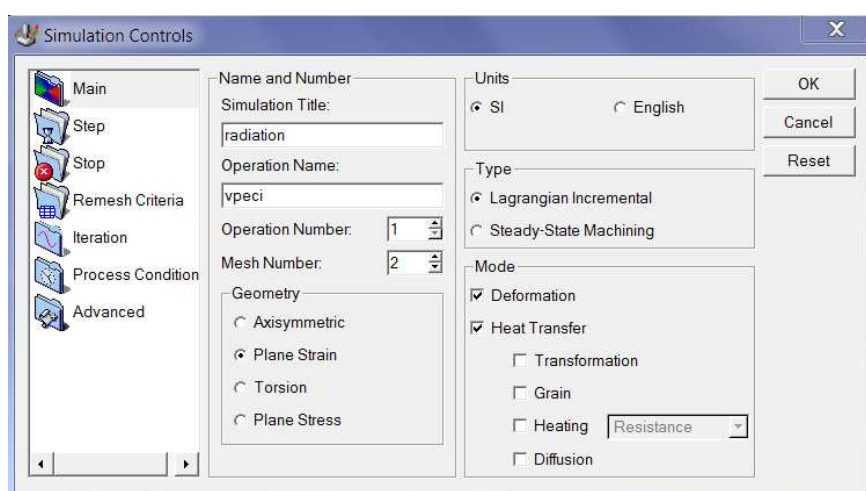
Nastavení pece a zbylých sedmi ingotů pro výpočet:

Úkolem pece a zbylých sedmi ingotů bylo v podstatě sálát teplo na ingot I 45 VNH. Tomu odpovídalo nastavení výpočtu. Na obr. 27 je vidět hlavní nastavení. Pec a ingoty se chovaly jako pevné (rigidní) a pouze sálaly teplo. Zde byla emisivita nastavena na hodnotu 0.75. Jejich teplota byla nastavena na 1150°C a materiál byl zvolen pro všechny stejný, a to AISI H 13. Geometrie byla opět načtena z pomocného grafického programu. Byla nastavena základní síť.

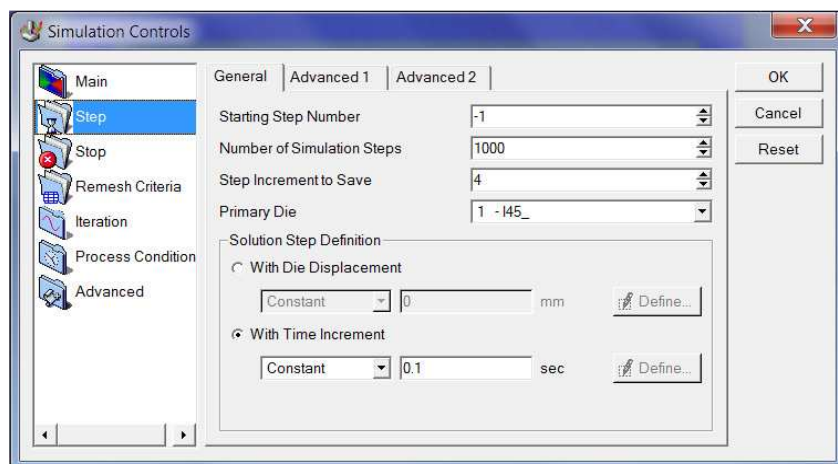


Obr. 27 Základní nastavení pro pec a zbylé ingoty

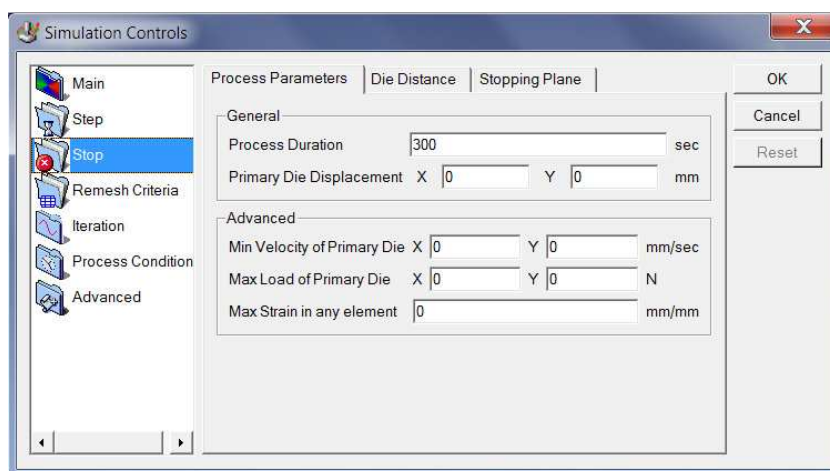
Jestliže byly nastaveny všechny podmínky výpočtu (ať už pro ingot I45 VNH, pec či zbylé ingoty), přešlo se na nastavení podmínek průběhu simulace. K tomu nám slouží „Simulation control“, jak již bylo popsáno v kapitole 4.2.1. Na obrázku 28 je zobrazeno hlavní nastavení průběhu simulace. Zde se zadává název simulace, jednotky (v našem případě byly zvoleny SI), dále druh simulovaného procesu, tzn. deformace spolu s teplotními výpočty atd. Dalším krokem je poté nastavení počtu kroků, resp. počet kroků pro uložení a časový přírůstek (viz Obr. 29). Jelikož nás zajímá vliv přestupu pouze prvních pět minut, bude simulace ukončena po dosažení této hodnoty (viz obr 30). Posledním krokem bylo nastavit teplotu okolí. Ta byla stanovena na teplotu 1150°C (viz obr 31). Pro přesnější výpočty přestupu tepla je důležité mít zapnutou funkci „View factor calculation“. Po úspěšném nadefinování všech podmínek následuje vygenerování samotné databáze „Database generation“ (viz obr. 32). Jestliže je databáze vygenerovaná správně, lze spustit samotný výpočet „Run simulation“.



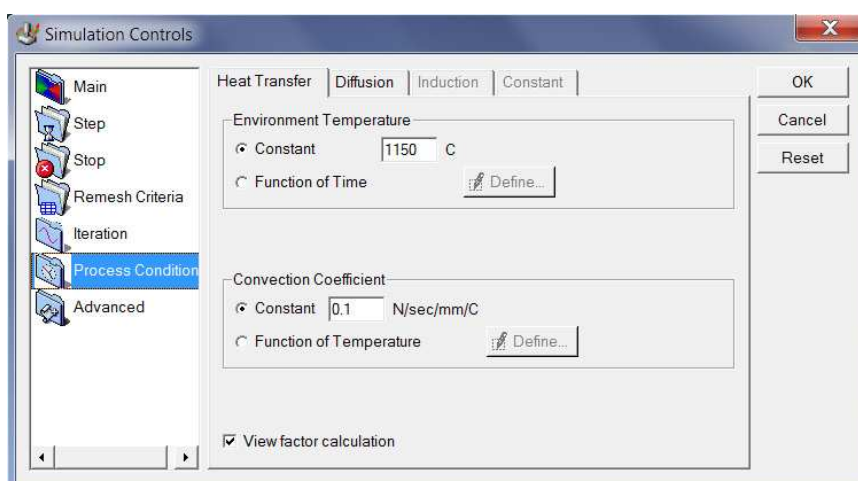
Obr. 28 Panel nastavení základních parametrů



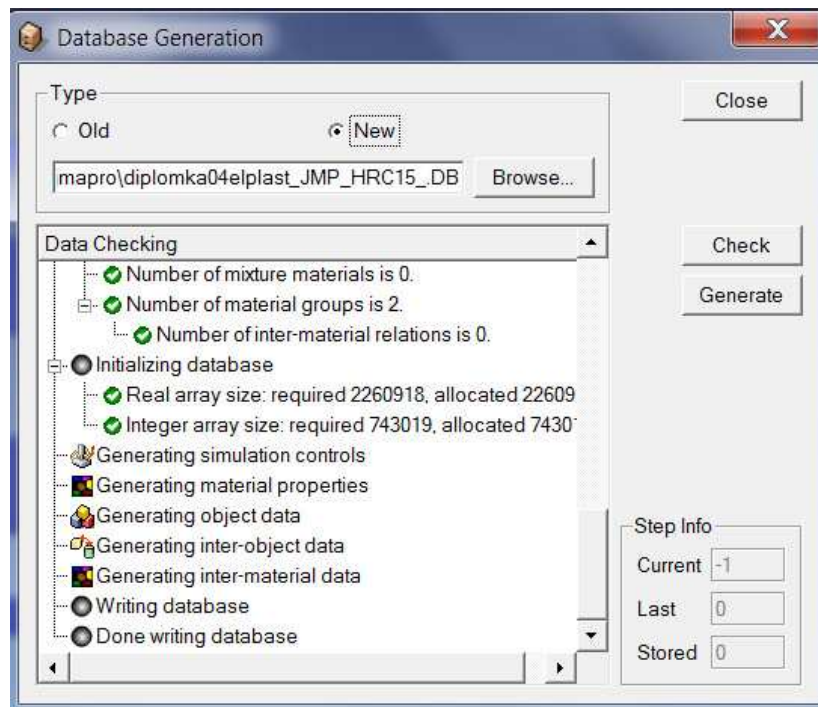
Obr. 29 Panel nastavení kroků simulace



Obr. 30 Panel nastavení průběhu simulace



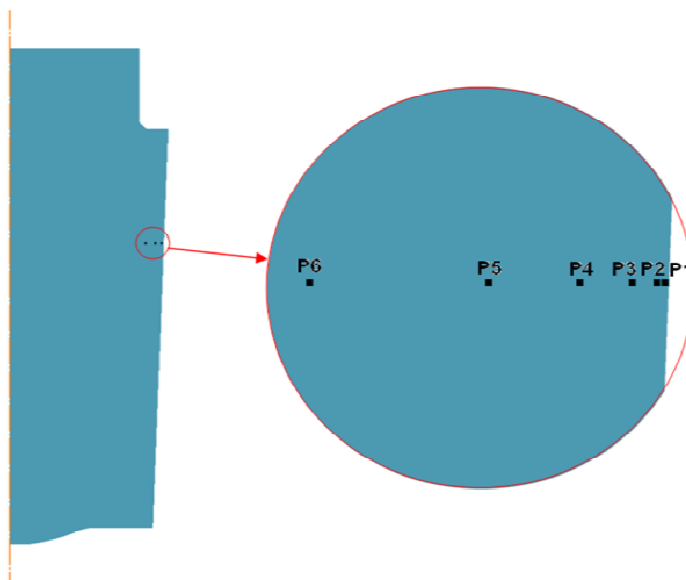
Obr. 31 Panel nastavení „Proces condition“



Obr. 32 Vygenerovaná databáze

5. Hodnocení simulace Postprocessor

Po výpočtu databáze se daný výpočet zobrazí v grafickém modulu „Postprocessor“, kde dojde k analýze výpočtu. Funkce Postprocessoru byla popsána v kapitole 4.2.1. Přistoupíme tedy k samotné analýze. Po vložení ingotu do pece dojde k tepelnému šoku, který se projeví vznikem napětí v ingotu. Výpočet měl ukázat, jak velké napětí vzniká na straně ingotu přilehlé k pecní vyzdívce, kde se předpokládá největší napětí (s ohledem na předcházející výpočty pro jeden a dva ingoty). Bylo uvažováno jak teplotní pnutí tak i strukturální pnutí. Pro samotné hodnocení bylo vybráno šest bodů P1 – P6 (obr. 33). Tyto body byly rozmístěny od povrchu a ve vzdálenostech 3, 10, 25, 50 a 100 mm. V jednotlivých bodech byly sledovány změny teploty a napětí. Poloha bodů byla určena s ohledem na předchozí výpočty prováděné pro jeden, resp. dva ingoty. Tak aby bylo možno stanovit vliv vsázky ingotů, teplotního pole a vlastností materiálu z programu JMatPro na rozložení teploty a napětí v ingotu. Analyzováno bylo napětí a teplota po 1, 3 a 5 min. po vložení ingotu do pece. Dále teplota a napětí v jednotlivých bodech a v neposlední řadě rozložení teplotního a napěťového pole v ingotu.

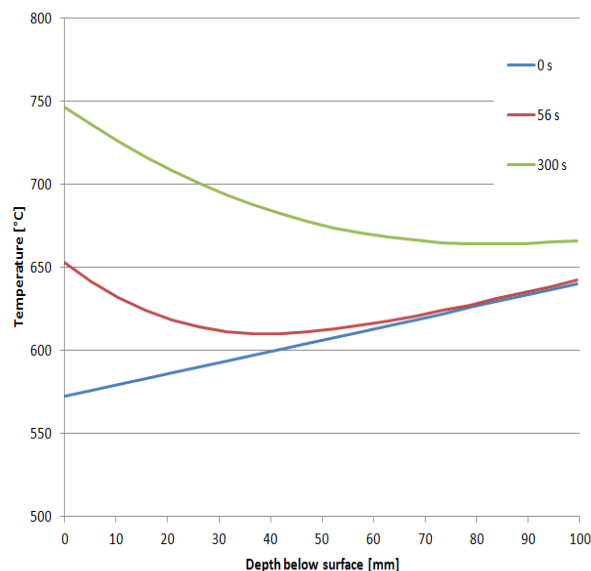


Obr. 33 Rozmístění jednotlivých bodů

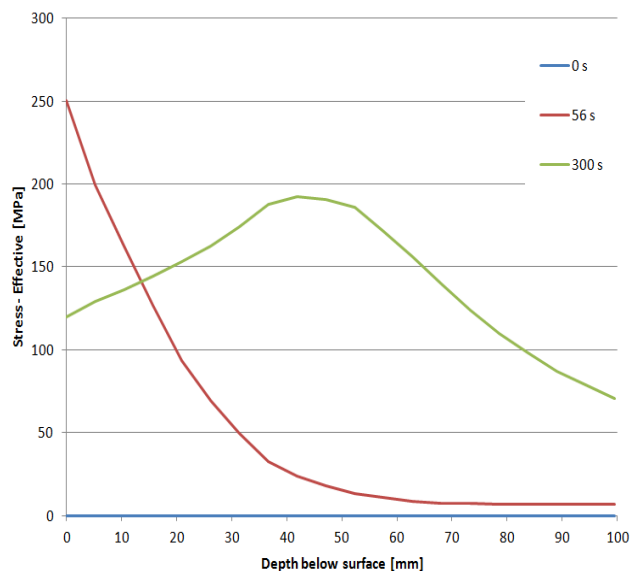
5.1 Rozložení teploty a napětí v čase v jednotlivých bodech

Poté, co byl ingot vsazen do pece, byla sledována teplota a napětí, a to okamžitě po uložení ingotu do pece (0 s), po jedné minutě a po 5 minutách. Na obr. 34 je zobrazena závislost teploty na hloubce od povrchu v jednotlivých časech a na obr. 35 je zachycena závislost napětí na hloubce od povrchu v jednotlivých časech. Z porovnání obou grafů je patrné, že v čase ihned po vsazení ingotu do pece (0 s) je nejmenší teplota na povrchu a teplota roste se zvyšující se hloubkou v ingotu. Z toho je patrný vliv teplotního pole, které zatím není ovlivněno samotnou teplotou pece či vsázkou. V tomto čase je patrné minimální napětí vyvolané tepelným šokem. Po zhruba jedné minutě dosahuje teplota cca. 653 °C a napětí na povrchu dosahuje maximální hodnoty 251 MPa. Toto napětí klesá se vzdáleností od povrchu. Ve vzdálenosti 50 mm od povrchu je již nepatrné. Po pěti minutách je teplota povrchu nejvyšší, dosahuje 750 °C. Čím více se posouváme do hloubky ingotu, tím klesá

teplota ingotu až do samotného vyrovnání teploty. Napětí na povrchu dosahuje hodnoty cca. 110 MPa. Toto napětí postupně rostlo až do hloubky 50 mm, kde dosáhlo maxima 192 MPa. Poté dochází ke snižování napětí. Zvýšení napětí může být způsobeno nehomogenitou teplotního pole v materiálu. Obecně lze říci, že s rostoucí hloubkou v ingotu dochází k postupnému vyrovnávání teploty. Maximální teploty je dosaženo po pěti minutách v peci. Co se týče napětí, se vzrůstající teplotou a časem dochází ke snižování napětí.



Obr. 34 Závislost teploty na hloubce od povrchu



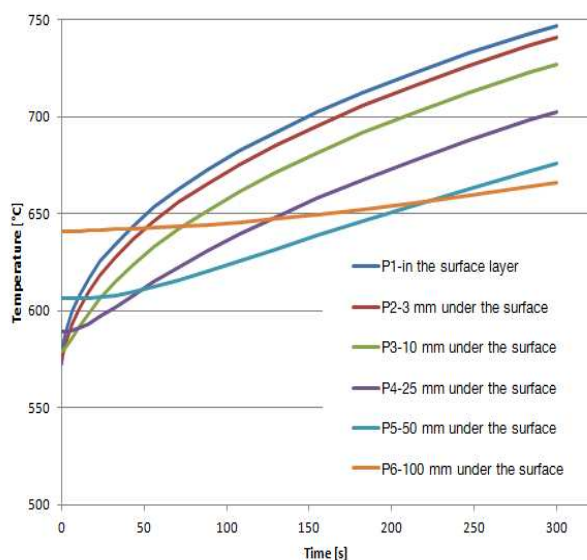
Obr. 35 Závislost napětí na hloubce od povrchu

5.2 Rozložení teploty a napětí v jednotlivých bodech

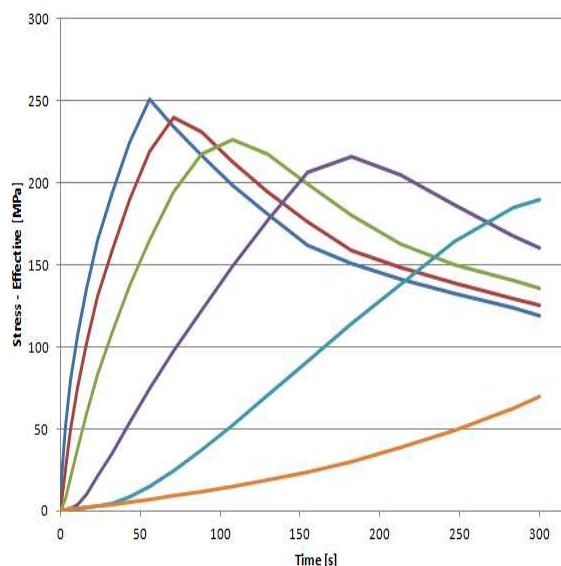
Jak již bylo řečeno, teplotní a napětíová charakteristika byla sledována v jednotlivých bodech P1, P2, P3, P4, P5 a P6 ve vzdálenostech od povrchu v 3mm, 10 mm, 25 mm, 50 mm a 100 mm. Sledovalo se napětí a teplota v čase od 0 s až po 300 s, kdy již odeznívá teplotní šok a dochází k vyrovnávání napětí a teploty v ingotu. Na obr. 36 můžeme sledovat rozložení teploty v čase pro různé body. Z obrázku je patrné, že těsně po vložení ingotu do pece jsou nejvíce náchylná místa na povrchu ingotu. Nejvyššího nárůstu je dosahováno zhruba do první minuty od vložení ingotu do pece. Zde je vidět, že během zhruba jedné minuty dojde k navýšení teploty o zhruba 100 °C. V tomto bodě se dá předpokládat i nejvyšší napětí. Zhruba po jedné minutě už není nárůst teploty tak markantní a dochází k postupnému vyrovnávání teploty v ingotu. Například v časovém intervalu od 150 s do 300 s dojde k navýšení teploty cca. 50 °C. V hloubce 100 mm od povrchu je patrné, že zde je dosahováno velice malého rozdílu teplot. Tento rozdíl činí od vložení do pece po 300 s zhruba 40 °C. Dá se zde proto předpokládat i nejmenší napětí způsobené tepelným pnutím.

Na obr. 37 můžeme vidět rozložení napětí v čase v jednotlivých bodech. Z obrázku je zřejmé, že nejvyššího napětí je dosahováno na povrchu ingotu, a to zhruba během první minuty. Tato hodnota činí 251 MPa. Jak se pohybujeme stále více pod povrch ingotu, dochází ke snižování maximálního napětí. Ve vzdálenosti 100 mm pod povrchem a v čase 300 s je hodnota napětí zhruba 70 MPa. Oba grafy spolu opět úzce souvisí. Je patrné, že nejvyššího

napětí je dosahováno tam, kde dochází k největšímu nárůstu teploty. Naopak v místech s nejmenším teplotním rozdílem je napětí nejmenší. Dále je patrné, že čím, jak se pohybujeme od povrchu ingotu do středu, dochází ke snižování rozdílu hodnot teplot, a tím i ke snižování napětí. To může být způsobeno teplotním polem, jelikož jak se pohybujeme do středu ingotu, je zde i vyšší teplota.



Obr. 36 Závislost rozložení teploty v čase pro jednotlivé body



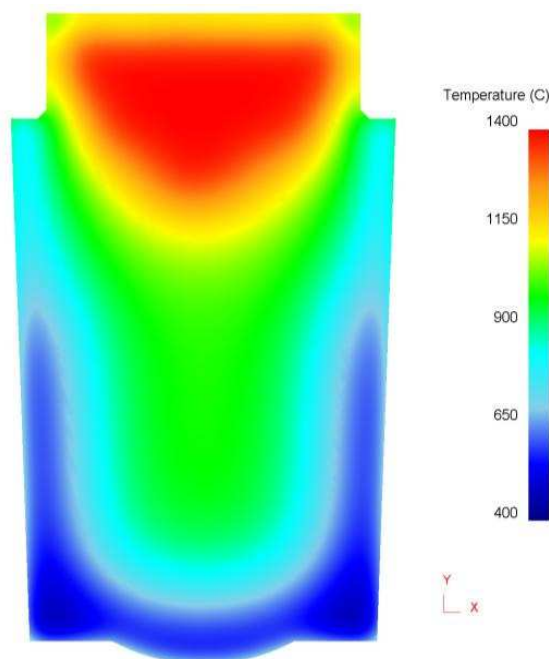
Obr. 37 Závislost rozložení napětí v čase pro jednotlivé body

5.3 Porovnání teplotního a napěťového pole v ingotu

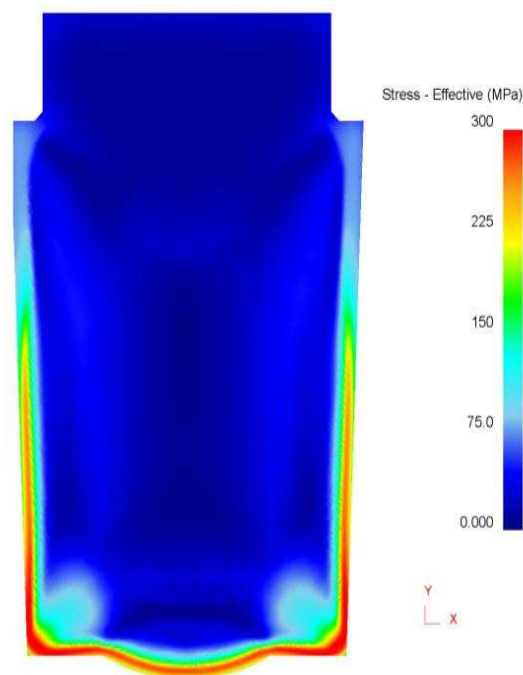
5.3.1 Teplotní a napěťové pole v ingotu bez uvažování strukturního napětí

Na obrázku 38 a 39 je uvedeno teplotní resp. napěťové pole v ingotu po pěti minutách v peci. Pomocí softwaru Deform – 2D je možno stanovit to, jakým způsobem dojde ke změně teplotního pole v ingotu. Toto má přímou návaznost na napěťové pole v ingotu. Na obr. 38 je patrné rozložení teploty a je zde vidět, že v hlavové části ingotu a středu ingotu je nejvyšší teplota. To by mělo znamenat, že v těchto místech bude napětí dosahovat nejmenších hodnot. Naproti tomu na spodní části ingotu a na bocích jsou teploty nejnižší, a tak se zde dá předpokládat největší tepelný šok, z čehož plyne i největší napětí.

Na obr. 39 je rozložení napětí v ingotu. Je možno si všimnout, že napětí opět úzce souvisí s rozložením teploty. Je patrné, že v nejchladnějších místech ingotu je největší napětí a naopak v nejteplejších místech dosahuje napětí nejmenších hodnot. Pokud budeme nasazovat ingot do pece, bude se vytvářet napětí primárně v místech, která jsou nejchladnější a existuje zde největší teplotní rozdíl. Teplotní a napěťové pole ukazuje, že pokud by se měly vytvářet trhliny vlivem tepelných pnutí, bude to v povrchových místech v okolí pudy ingotu a na bocích ingotů. Zde může být dosahováno napětí až 300 MPa.



Obr. 38 Teplotní pole v ingotu

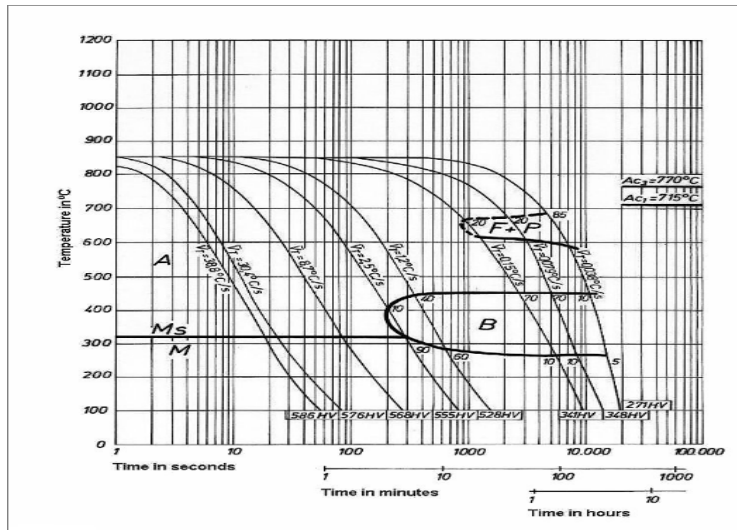


Obr. 39 Napěťové pole v ingotu

5.3.2 Teplotní a napěťové pole v ingotu s uvažováním strukturního napětí

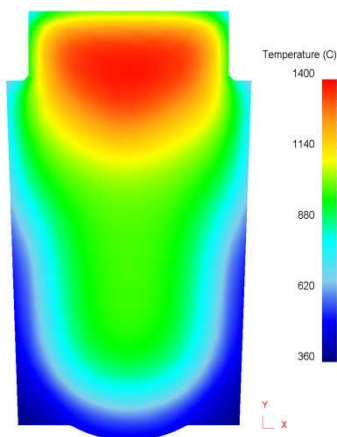
Vlivem ohřevu materiálu vznikají kromě teplotních napětí i strukturní napětí. Snahou bylo tyto napětí zohlednit ve výpočtu. Prvním krokem bylo nutno vytvořit strukturní rozložení v daném ingotu. Vycházelo se z ARA diagramu materiálu 34CrNiMo6 (obr. 40) a rozložení teploty v ingotu (obr. 41). Uvažovala se doba zhruba dvou hodin (což je doba, která odpovídá času, po kterém by měl ingot být nasazen do pece v provozu kovárna od doby, kdy byl stripován v provozu ocelárna) chladnutí z toho plynoucí a strukturní rozložení viz (obr. 42 a obr. 43). Je patrné, že v ingotu je obsažen převážně austenit a v místech, kde je nižší teplota, se vyskytuje nejvíce perlit v nejnižších teplotách. V rozích ingotu a u půdy ingotu v dolní části lze uvažovat i bainit. Toto rozložení bylo uvažováno před vstupem ingotu do pece. Na obr. (44) je vidět teplotní rozložení a na obr. (45 a 46) strukturní rozložení po pěti minutách v peci. Je patrné, že za časové období pěti minut nedošlo k výrazné změně ve struktuře.

Na (obr. 47) a (obr. 48) můžeme vidět rozložení teploty a napětí v ingotu po pěti minutách v peci s uvažovaným strukturním napětím. Stejně jako v kapitole 5.3.1 je patrná závislost teploty na rozložení napětí, jak již bylo popsáno. Při uvažování strukturního napětí je patrné, že napětí nezasahuje do takové hloubky a vyskytuje se více na povrchu ingotu. Nejvíce namáhán je ingot na bocích, v dolní části ingotu a v rozích ingotu, kde je naměřeno max. napětí 340 MPa. Jak je vidět, při uvažování strukturních změn dojde k navýšení napětí o cca. 40 MPa oproti ingotu bez uvažování strukturních změn.

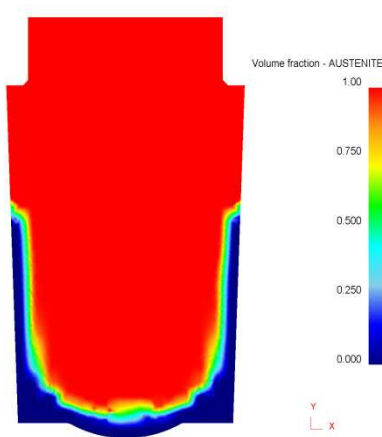


Obr. 40 ARA diagram 34CrNiMo6 [25]

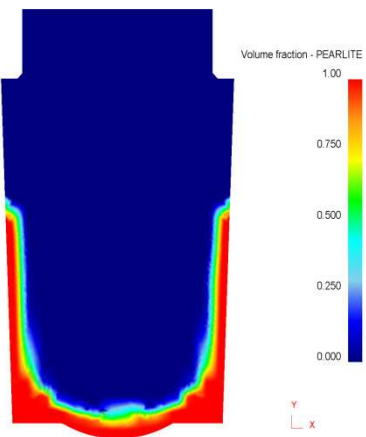
Před vložením ingotů do pece



Obr. 41 Teplotní pole

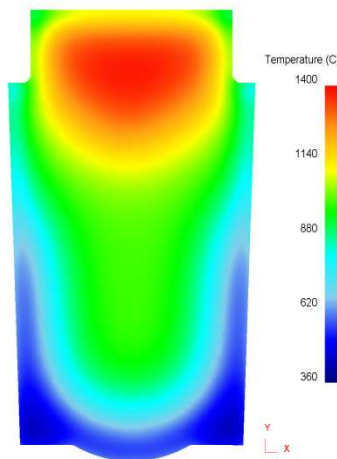


Obr. 42 Rozložení austenitu

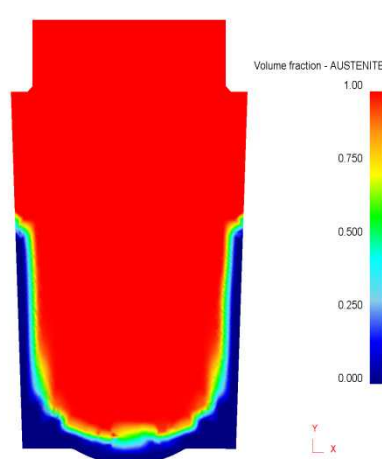


Obr.43 Rozložení perlitu

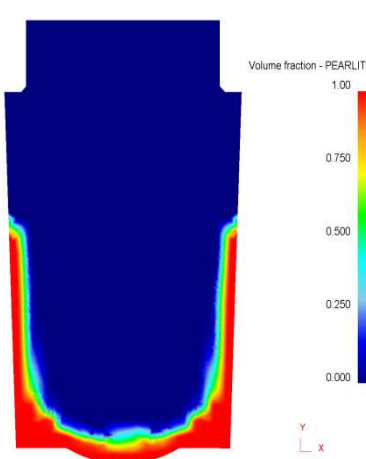
Ingoty v peci po 300 s



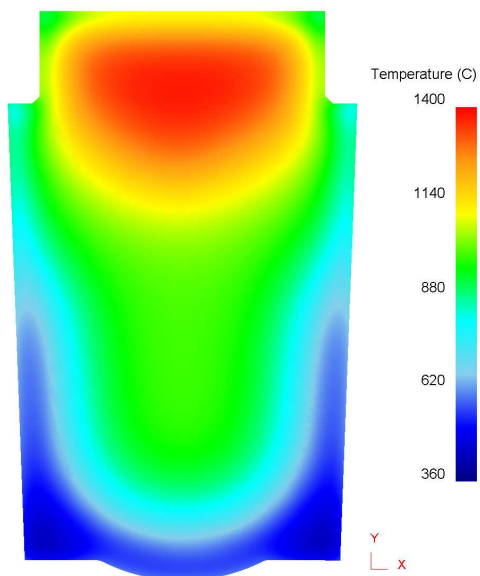
Obr. 44 Teplotní pole



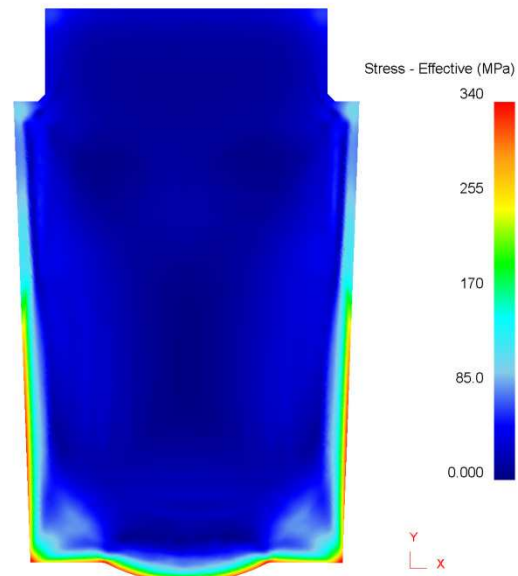
Obr. 45 Rozložení austenitu



Obr.46 Rozložení perlitu



Obr. 47 Teplotní pole v ingotu



Obr. 48 Napět'ové pole v ingotu

Závěr:

Tato diplomová práce se zabývala vlivem sálání pecní vyzdívky na vsázku ingotů a z toho vyplývající možný vznik trhlin při ohřevu ingotů z materiálu 34CrNiMo6. Práce navazovala na předešlé výpočty, kde byl uvažovaný ingot I 45 VNH o teplotě 600 °C vložen do pece jeden metr od stěny vytemperované na teplotu 1150 °C. Pro výpočet byl použit software Deform – 2D. Výpočet ukázal, že v ingotu, může vznikat velké napětí, způsobené teplotním šokem. Při daných podmínkách bylo ve sledovaných bodech naměřeno napětí na povrchu po 1 min. cca. 250 MPa (při teplotě povrchu 670 °C) a po 5 min. cca 480 MPa (při teplotě 750 °C) tato napětí s rostoucí hloubkou klesají. Při vložení druhého ingotu do pece poklesne napětí o zhruba 20 % [23,24]. Další kroky vedly ke zpřesnění výpočtu.

Zpřesnění výpočtu bylo ovlivněno vstupními parametry, a to především vsázkou ingotů, nehomogenním teplotním polem v ingotu I 45 VNH, které bylo vytvořeno na základě podkladů z programu Magma a výpočtem zpřesněných dat pro materiál 34CrNiMo6, pro který byl využit program JMatPro. Na základě těchto podmínek byl sestaven výpočtový model viz kapitola 4.3.3. Samotný výpočet ukázal, že v ingotu mohou vznikat velká napětí způsobená teplotním šokem, která však nedosahují takových hodnot, jak se původně předpokládalo.

Z obrázku číslo 35 je patrné, že ve sledovaném bodě na povrchu zhruba po jedné minutě je dosahováno napětí cca. 250 MPa (při teplotě 650 °C). Což je i v souladu s předchozími výpočty. Změna však nastává po 5 minutách. Zde je naměřeno napětí na povrchu cca. 120 MPa (při teplotě cca. 750 °C). Zde se projevuje výrazný vliv teplotního pole. Na obrázcích 36 a 37 jsou uvedeny závislosti teploty a napětí v čase pro jednotlivé body. Z grafů plyne, že čím více se pohybujeme od povrchu do středu, tím dochází ke snižování nárůstu teploty resp. ke snižování hodnot napětí. Je zde vidět i časová závislost, kdy nejvyššího napětí je dosahováno po první minutě ohřevu. S přibývajícím časem dochází ke snižování nárůstu teploty a tím i ke snižování napětí. Nejvyšší napětí je tedy dosahováno na povrchu ingotu po jedné minutě, kde je 251 MPa.

Ukazuje se vliv strukturních napětí. Na obrázku 39. je teplotní pole bez uvažování strukturního napětí. Z obrázku vyplývá, že nejvyššího napětí je dosahováno ve spodní části ingotu, a to 300 MPa. Při uvažování strukturních přeměn (obr. 48) činí toto napětí 340 MPa. Z porovnání obou obrázků je vidět, že se mění i rozložení tohoto napětí, kdy u uvažování strukturních přeměn je toto napětí spíše na povrchu a nezasahuje do takové hloubky ingotu.

Ukazuje se, že pro hodnocení vlivu sálání v peci je nutno uvažovat především vsázku ingotů, které jsou již prohřáté v peci. Numerické simulace zpřesnily představu o chování ingotu po založení do pece vyhřáté i s ostatními ingoty vsázky na kovací teplotu. Ukazuje se, že při dodržení směrnice týkající se ohřevu ingotů ve společnosti Pilsen Steel by nemělo docházet ke vzniku trhlin vlivem teplotního šoku. Důležitá je hlavně teplota ingotu tak, aby byla dodržena definice „teplého ingotu.“ Tím by bylo zabráněno výraznému tepelnému šoku. V blízké době bude provedena finální 3D simulace této problematiky, která by měla ještě o něco zpřesnit výsledky 2D simulace. A tím bude projekt ukončen.

Výsledky této práce byly prezentovány na konferenci Metal 2012 [21].

Použitá literatura:

- [1] Jandoš, F. et al. (2009). Výzkum příčin výrobních vad hmotných výkovků pro lodní a energetický průmysl, Project final report: MPO TANDEM FT - TA3/083, PILSEN STEEL s.r.o., unpublished
- [2] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 187 s. ISBN 80-010-2409-1.
- [3] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac. /. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. ISBN 80-214-2409-5 (brož.).
- [4] KREMER, Rudolf. KREMER RUDOLF. *Ohřev kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974, 422 s.
- [5] BOUCNÍK, Pavel. *Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných vlastností odlitků*. Brno, 2002. Disertační práce. VUT FSI.
- [6] VLK, Vlastimil. PILSEN STEEL. *Tuhnutí ingotů 2*. Plzeň, 2011.
- [7] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-706-3.
- [8] VLK, Vlastimil. PILSEN STEEL. *Tuhnutí ingotů 1*. Plzeň, 2011.
- [9] PILSEN STEEL. *Ohřev a mezi ohřev ingotů a rozkovaných výkovků v provozu Kovárna: Směrnice*. Plzeň, 2011.
- [10] PROŠEK, Martin a Jiří HODAN. Optimalizace ohřevu nástrojových a martenzitických korozivzdorných ocelí. 2008, s. 7.
- [11] BROŽOVSKÝ, Jiří a Alois MATERNA. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ VE STAVEBNÍ MECHANICE. 2012, s. 123.
- [12] FUSEK, Martin a Radim HALAMA. MKP a MHP. 2012, s. 94.
- [13] POLÁK, Jří. *Návrh termoizolačního boxu pro měřicí ústředny*. Brno, 2004. Diplomová práce. VUT FSI. Vedoucí práce Ing. Josef Štětina.
- [14] Ansys. ANSYS, Inc. [online]. [cit. 2012-05-09].
- [15] MSC Nastran. MSC SOFTWARE. [online]. [cit. 2012-05-09]. [16] SCIENTIFIC FORMING TECHNOLOGIES CORPORATION. *DEFORM 2DTM v10.0 system manual*.
- [16] *DEFORM 2DTM v10.0 system manual*. Ohio, 2009.

- [17] PILSEN STEEL. *Tabulka Ingotů*. Plzeň, 2012.
- [18] PILSEN STEEL. *Výkresová dokumentace*. Plzeň, 2011.
- [19] MACHÁČKOVÁ, Adela a Radim KOCICH. SDÍLENÍ TEPLA A PROUDĚNÍ. 2012, s. 194.
- [20] Ansys. ANSYS Fluent, Inc. [online]. [cit. 2012-05-09].
- [21] TIKAL, Filip, Michal DUCHEK a Ondřej BAROCH. NUMERICAL SIMULATIONS OF EFFECTS OF FURNACE LINING RADIATION ON BATCH OF VARIOUS INGOTS. 2012, s. 5.
- [22] PILSEN STEEL. *Obrazové podklady*. Plzeň, 2011.
- [23] Duchek, M., Jandoš, F. & Tikal, F. (2011). Numerické simulace vlivu sálání pecní vyzdívky na ingoty z materiálu 34CrNiMo6, Proceedings of METAL 2011, Brno, Czech Republic, ISBN 978-80-87294-22-2, pp. 48 – 49
- [24] Tikal, F. & Duchek, M. (2011). FEM analyses of the radiation in heating forging furnace, Proceedings of Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings, Vienna, Austria, ISBN 978-3-901509-83-4, pp. 1283-1284
- [25] METAL RAVNE STEEL SELECTOR V.4.0. *DIN 34CrNiMo6*. 2011. vyd.