

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Obor **2303V 002** Strojní inženýrství

zaměření

Strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie

**NUMERICKÉ SIMULAČNÍ VÝPOČTY VE SLÉVÁRENSKÝCH
PROCESECH A MATERIÁLECH**

**NUMERICAL SIMULATION CALCULATIONS IN FOUNDRY
PROCESS AND MATERIALS**

[Doktorská práce]

Autor: Ing. Josef Horáček

Školitelka: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Téma:

Numerické simulační výpočty ve slévárenských procesech a materiálech

Theme:

Numerical simulation calculations in foundry process and materials

Anotace:

Disertační práce se zabývá posouzením vlivu jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin na stabilitu simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách. Současně se zaměřuje na stanovení teplotní závislosti součinitelů přestupu a prostupu tepla.

Práce se dále zabývá problematikou, která se zaměřuje na výsledný produkt samotného procesu lití, kterým je odlitek. Tím je myšleno chování struktury odlitku po odlití, tedy predikce chování vazeb mezi grafitem a matricí v rámci působení vnějších sil a napěťových stavů. V rámci toho je důležité, aby makroskopické mechanické vlastnosti materiálu byly založeny na jeho mikromechanickém chování.

Annotation:

Dissertation assesses the influence of various thermal-physical quantities on the stability of the simulation calculation of castings solidification and cooling in foundry molds. At the same time it aims at determining the temperature dependence of heat transmission and heat transfer coefficients.

The thesis also deals with the issue focused on the final product of the casting process itself which is a cast. It means the behavior of the cast structure after the casting therefore behavior prediction of the bonds between graphite and the matrix under the action of external forces and stress conditions. In that context it is important that the macroscopic mechanical properties of the material are based on its micromechanical behavior.

Poděkování

Mé poděkování patří zejména Prof. Ing. Ivě Nové, CSc, za její cenné rady a věcné připomínky, které mi při tvorbě disertační práce poskytovala a za trpělivost, kterou se mnou při tvorbě této disertační práce měla.

Dále bych rád poděkoval katedře strojírenské technologie za poskytnuté podmínky. A v neposlední řadě i své rodině a všem spolužákům a přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli mi inspirací.

1 Obsah

2	Úvod.....	7
2.1	Cíle disertační práce	9
2.2	Publikace doktoranda.....	10
3	Teoretický základ o slévárenství a simulacích	11
3.1	Slévárenství	11
3.2	Tepelné děje při plnění a tuhnutí mezi odlitkem a formou.....	12
3.2.1	Přenos tepla vedením (Kondukce)	12
3.2.2	Přenos tepla prouděním (Konvekce)	13
3.2.3	Přenos tepla sáláním (Radiace)	14
3.2.4	Kombinovaný přenos tepla	16
3.2.5	Přenos tepla v tavenině	17
3.2.6	Tuhnutí odlitku ve slévárenské formě	18
3.2.7	Tepelné procesy na hranici mezi odlitkem a formou.....	24
3.3	Tepelně-fyzikální veličiny slévárenských materiálů	28
3.3.1	Součinitel tepelné vodivosti	28
3.3.2	Měrná tepelná kapacita	31
3.3.3	Součinitel teplotní vodivosti	32
3.3.4	Součinitel přestupu tepla	33
3.3.5	Součinitel prostupu tepla	33
3.3.6	Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy	34
3.4	Fyzikální veličiny odlévaného materiálu	36
3.5	Simulační výpočty	38
3.5.1	CAE - Computer-aided engineering.....	39
3.5.2	Numerické výpočty používané v simulačních programech	41
3.6	Matematický model programu QuikCAST	46

4	Teoretický základ grafitických litin	49
4.1	Druhy litin	49
4.2	Grafitické litiny	50
4.3	Strukturní složky litin	52
4.3.1	Grafit	52
4.3.2	Základní kovová hmota	54
4.4	Krystalizace litin	56
4.5	Mechanické vlastnosti LLG	57
4.5.1	Statické mechanické vlastnosti	57
4.5.2	Dynamické mechanické vlastnosti	61
4.6	Úvod do problematiky chování grafitických litin	63
5	Experimentálně-výpočtová část tepelných procesů	65
5.1	Popis měřicího zařízení pro potřeby experimentů	65
5.2	Použité slévárenské materiály při experimentech	69
5.3	Experimenty pro sledování tepelných polí v odlitku a kokile	70
5.4	Simulační výpočty	72
5.4.1	Pre processing	72
5.4.2	Processing	73
5.4.3	Post processing	73
5.4.4	Vliv tepelné vodivosti formy	75
5.4.5	Vliv součinitele prostupu tepla	77
5.5	Souhrn simulačních výpočtů	103
5.6	Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků tělesa volantů	105
6	Simulační výpočty predikce chování grafitických litin	111
6.1	Pre processing	112
6.1.1	Vytvoření výpočtového modelu	113
6.1.2	Materiálové vlastnosti	118

6.1.3	Popis okrajových podmínek pro model mikrostruktury litiny	119
6.1.4	Vazby mezi grafitem a matricí	120
6.1.5	Zatížení (Síly)	121
6.2	Processing	123
6.3	Post-processing	124
6.3.1	Výsledky „Vázaný kontakt“ vzorek 1 (2300strain_q004).....	124
6.3.2	Výsledky „Vázaný kontakt“ vzorek 2 (MicroS)	125
6.3.3	Výsledky „Vázaný kontakt“ vzorek 3 (CG4983_q002)	126
7	Diskuze výsledků	127
8	Závěr.....	137
9	Použitá literatura	142

Přehled použitých veličin a jednotek

A, B, C	- materiálové konstanty
a	- součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
b_F	- součinitel tepelné akumulace formy [$\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
B_{iO}	- Biotovo kritérium (číslo) odlitku [1]
B_{iF}	- Biotovo kritérium (číslo) formy [1]
c	- měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_F	- měrná tepelná kapacita materiálu formy [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_P	- měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_S	- měrná tepelná kapacita pro tuhý stav látky [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_L	- měrná tepelná kapacita pro kapalný stav látky [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
C	- součinitel záření skutečného tělesa; $C = C_O \cdot \varepsilon$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
C_O	- součinitel sálání absolutně černého tělesa; $C_O = 5,775 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
grad T, ΔT	- teplotní gradient (rozdíl teplot ve dvou místech tělesa) [K]
k	- konstanta tuhnutí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$]
K_O	- pomocné kritérium pro odlitek [1]
K_F	- pomocné kritérium pro formu [1]
L_{KR}	- latentní (krystalizační) teplo pro 1 kg kovu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
m	- hmotnost látky [kg]
q	- měrný tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
q_D	- tepelný tok při sdílení tepla dotykem [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
q_F	- tepelný tok formy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
q_O	- tepelný tok odlitku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
q_P	- tepelný tok na povrchu tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
q_S	- sálavý tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
Q_{ZDR}	- tepelný výkon všech vnitřních zdrojů tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
Q_D	- celkové množství tepla prošlé povrchem odlitku do formy dotykem [J]
Q_F	- teplo akumulované formou [J]
Q_1	- teplo uvolněné odlitkem [J]
Q_2	- teplo prošlé povrchem odlitku do formy [J]
dQ	- přírůstek tepla [J]
S	- povrch tělesa [m^2]

S	- teplosměnná plocha (dotyku; sálání) [m ²]
dS	- element plochy [m ²]
t	- čas [s]
T	- teplota [°C], [K]
T _F	- počáteční teplota formy [°C], [K]
T _{F stř}	- střední teplota formy [°C], [K]
T _{KR}	- teplota krystalizace taveniny [°C], [K]
T _l	- lící teplota [°C], [K]
T _L	- teplota likvidu odlévané taveniny [°C], [K]
T _S	- teplota solidu odlévané taveniny [°C], [K]
T _{PF}	- teplota povrchu formy [°C], [K]
T _{PO}	- teplota povrchu odlitku [°C], [K]
T _{TAV}	- teplota tavení [°C], [K]
T ₀	- teplota v čase t = 0 [°C], [K]
T _t	- teplota tání [°C], [K]
T _{Zkstř}	- střední teplota ztuhlé kůry odlitku
TPO _M	- tepelný přechodový odpor mezery [m ² .K.W ⁻¹]
TOP _{POČ}	- počáteční tepelný přechodový odpor [m ² .K.W ⁻¹]
TPO _{OXID}	- tepelný přechodový odpor oxidické vrstvy odlitku [m ² .K.W ⁻¹]
TPO _{VZ}	- tepelný přechodový odpor vzduchové vrstvy [m ² .K.W ⁻¹]
TPO _N	- tepelný přechodový odpor nátěru kokily [m ² .K.W ⁻¹]
u,v	- souřadnice místa plochy [m]
V	- objem tělesa [m ³]
X _F	- charakteristický rozměr formy [m]
X _M	- šířka mezery [m]
X _N	- tloušťka nátěru / nástřiku líce formy [m]
X _O	- charakteristický rozměr odlitku [m]
X _{OV}	- tloušťka oxidické vrstvy [m]
X _{PV}	- tloušťka plynové vrstvy [m]
X ₂	- tloušťka prohřáté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí odlitku [m]
x, y, z	- prostorové souřadnice bodu [m]
α ₁	- součinitel přestupu tepla na hranici odlitek – oxidická vrstva [W.m ⁻² .K ⁻¹]

α_2	- součinitel přestupu tepla na hranici nátěr kovová forma [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
α	- součinitel přestupu tepla [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
$\alpha_{\text{F-O}}$	- součinitel přestupu tepla mezi formou a okolím [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
α_{S}	- součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
β	- efektivní součinitel prostupu tepla mezerou [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
β_{M}	- součinitel prostupu tepla v mezeře [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
δ	- tloušťka vrstvy, kterou prochází teplo [m]
ϵ	- emisní součinitel sálání resp. poměrná sálavost tělesa (0,7 až 0,9);
λ_{F}	- součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
λ_{M}	- součinitel tepelné vodivosti mezery [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
λ_{O}	- součinitel tepelné vodivosti odlitku [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
λ_{OV}	- součinitel tepelné vodivosti oxidické vrstvy [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
λ_{P}	- součinitel tepelné vodivosti plynové vrstvy [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
$\lambda_{\text{x}}, \lambda_{\text{y}}, \lambda_{\text{z}}$	- součinitele tepelné vodivosti ve směrech x, y, z [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
ξ	- tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku [m]
ρ_{F}	- hustota formy [kg.m^{-3}]
σ	- Stefan Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67.10^{-8}$ [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
∇	- Laplaceův nabla operator
FEM	- Finite elements method (MKP)
FDM	- Finite diferents method (MKD)
CVM	- Control volume method (MKV)
BEM	- Boundary element method (MOP)
CAE	- Computer-aided Engineering

2 Úvod

V současné době se simulační procesy prolínají do všech částí inženýrského světa. Od záchrany potopených lodí po crash testy na vozidle, ale především v technologických procesech. Tato práce se zaměřuje na simulační procesy v oblasti slévárenství. Naše pracoviště, Katedra strojírenské technologie, TU v Liberci má dlouhodobé zkušenosti se simulačními výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků již od prvních standardních kancelářských počítačů, od 90 let minulého století, kdy Katedru strojírenské metalurgie (později Katedru strojírenské technologie) vedl profesor Ing. Jaroslav Exner, CSc.

Pro výrobu kvalitních odlitků je proces tuhnutí a chladnutí velmi důležitý, což vedlo už v minulosti k mnohým výzkumům zaměřujícím se na tuto problematiku. A protože nebyla dostupná potřebná technika, jež by pomohla při řešení takto složitých dějů, tuhnutí a krystalizace kovů se posuzovala na základě metalografického posuzování makrostruktury nebo mikrostruktury. Řešení, těchto tepelných procesů v odlitku, vychází z prací CHVORINOVA [26], [27], který plně respektoval dřívější řešení SCHWARZE [28], NEUMANNA, CARSLAWA a aplikoval svůj zákon druhé mocniny pro popis tuhnutí odlitků ve slévárenských formách. Takto utvořený základ dal směr pro řešení dalších autorů. GULJAJEV [36] a RUDDLE [29] byly autoři prací, které velmi podrobně shrnují problematiku tuhnutí kovů a jejich slitin až do začátku 60. let. Další jedinečností řešení přispěli GIRŠOVIČ [35] a NECHENDZI [37]. Známá jsou také řešení VEJNIKA [30], [31], [32] a ANISOVIČE [33] s jedinečností zjednodušující použití náhradních křivek při řešení teplotních polí v odlitku a slévárenské formě.

Teprve s rozvojem výpočetní techniky a simulačních programů spolu s rozvojem experimentální techniky, je možné sledovat a definovat tuhnutí odlitků v krátkých časových úsecích. K těmto účelům byly vyvinuty celé řady slévárenských softwarů, jež mají základ v simulačních softwarech určených k napětíovým analýzám. Setkat se můžeme se slévárenskými softwary s názvem MAGMA 5, SIMTEC/WINCast, PROCAST, NOVACAST, SOLSTAR, SIMULOR atd. Kvalita simulačního programu závisí nejen na fyzikálně matematickém popisu tepelných dějů, ale také na obsáhlosti a kvalitě tepelně fyzikálních veličin odlitku a formy, jež se nacházejí v databázi simulačního programu.

Na tomto základě se tato disertační práce zaměřuje na samotný proces lití a tuhnutí odlitků. Pro potřebu řešení této části práce se využívá čistě neželezných (neferomagnetických) kovů, především pak hliníku, zinku a jejich slitin. U nich se za pomoci právě zmíněných simulací posuzuje vliv jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin na stabilitu simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévarenských formách. Věrohodnost těchto simulačních výpočtů se pak ověřuje experimenty, resp. sledováním časových závislostí teplot ve formě i v odlitku. Současně je sledován vliv jednotlivých tepelných veličin, v závislosti na teplotě, na průběh nasimulovaných výsledků. Jedním z hlavních záměrů disertační práce je také stanovení teplotní závislosti součinitelů přestupu nebo prostupu tepla.

Simulace věnující se odlitku nemusí být specificky zaměřeny jen na proces lití, tuhnutí a chladnutí. Další možností simulačních výpočtů je simulace struktury a chování odlitků při plnění svých užitných vlastností. Z materiálů odlitků je poměrně velmi komplikovaným materiálem, vzhledem ke stavbě struktury, litina s lupínkovým grafitem, která se kupříkladu používá k výrobě dílů dieselových spalovacích motorů v nákladním průmyslu. Má odborná stáž vedla ke spolupráci se švédskou univerzitou v Linköpingu, na tvorbě simulačního modelu mikrostruktury litiny s lupínkovým a červíkovým grafitem.

Proto se další část této práce zabývá problematikou, která se zaměřuje na výsledný produkt samotného procesu lití. Tím je myšlen odlitek a jeho chování na strukturální úrovni po odlití. Pokud totiž na vícefázový materiál působí vnější zatížení, rozložení napětí v mikrostruktuře je nevyhnutelně nehomogenní v důsledku různých mechanických vlastností základních fází. K těmto nehomogenním materiálům se řadí litiny, které se skládají z matrice (feritu, perlitu nebo směsi feritu a perlitu) a grafitu. Při vnějším tahovým zatížení litiny, grafit s nižší tuhostí a nekovovým charakterem vykazuje mnohem nižší napětí, než je tužší feritická nebo perlitická matrice. Grafit v matici litiny vytváří vrubové účinky, proto kolem lupínků grafitu dochází ke koncentraci napětí (koncentrační účinek napětí). V současné době je snaha zjistit vazby mezi grafitem a maticí a predikovat jejich chování v rámci působení vnějších sil a napětíových stavů. V rámci toho je důležité, aby makroskopické mechanické vlastnosti materiálu byly založeny na jeho mikromechanickém chování.

2.1 Cíle disertační práce

Na základě naznačených skutečností se daly nastolit cíle disertační práce. Práce se dělí na dvě základní témata. První z těchto dvou významných témat je posoudit vliv tepelně-fyzikálních veličin na tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách za použití simulačních výpočtů. V rámci těchto řešení se zároveň řešení práce zaměřuje na stanovení teplotní závislosti součinitelů přestupu či prostupu tepla.

Druhé z těchto témat se zaměřuje na chování struktury litinových odlitků po odlití a predikovat chování vazby mezi grafitem a základní kovovou hmotou (matricí) v rámci působení vnějších sil a napěťových stavů. Jelikož se jedná o analýzy mikrostruktur odlitku, je nutné, aby makroskopické mechanické vlastnosti materiálu byly založeny na mikromechanickém chování materiálu.

Dílní cíle práce jsou:

1. Experimentálně zjistit časové závislosti v tepelné ose odlitku a v definovaných místech slévárenské formy pro předem vybrané neželezné kovy. Součástí je i navržení, odzkoušení a použití metodiky pro měření teplotních polí v odlitku a slévárenské formě.
2. Provést simulační výpočty zjištěných časových závislostí a určení správných tepelně fyzikálních veličin pro vybrané neželezné kovy odlitku.
3. Ověřit výsledky případných experimentálních dat.
4. Vytvořit reálný simulační model mikrostruktury litiny s různým tvarem grafitu.
5. Určení a nasimulování vazeb v mikrostruktuře mezi matricí a grafitem.

Možný přínos:

Zpřesnění simulačních výpočtů v programu QuikCAST.

Možnosti optimalizace odlitků na základě simulačních analýz.

Prohloubení znalostí o pochodech, ke kterým dochází v mikrostruktuře při zatěžování na reálných odlitcích.

Možná predikce vad na funkčních odlitcích na základě kombinace experimentů a simulací.

2.2 Publikace doktoranda

- [1] HORÁČEK, J.: Measuring and simulation calculations field of temperature cast the shape of the plate, 7. Mezinárodní PhD konference, 47. Slévárenské dny 23. - 24. června 2010, Sborník příspěvků ISBN 978-80-904020-6-5
- [2] HORÁČEK, J., NOVÁ, I.: Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků z litiny, Univerzita J.E.Purkyně v Ústí n. Labem, Strojírenská technologie, prosinec 2011, číslo 6, ročník XVI, ISSN 1211-4162
- [3] MORÁVEK, J., HORÁČEK, J.: Sledování vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů, časopis Slévárenství 5-6/2012, ISSN 0037-6825
- [4] HORÁČEK, J.: Využití simulačního programu QikCAST ve slévárenství, časopis Slévárenství 1-2/2013, ISSN 0037-6825
- [5] HORÁČEK, J.: Využití simulačních výpočtů ve slévárenství, Konstruování - Green Engineering, Sborník ISBN 978-80-7372-937-0
- [6] HORÁČEK, Josef: FEM Study of Inhomogeneous Stress Distribution in Cast Irons. PhD Project, June 2013. LIU-IEI-TEK-A--13/01659--SE
- [7] HORÁČEK, J.: Simulační výpočty nehomogenního napětí v litinách, Strojírenská technologie, Sborník ISSN 1211–4162, Září 2013, ročník XVIII, číslo 3.
- [8] HORÁČEK, J NOVÁ, I.: Predikce tuhnutí odlitků těles volantů ze slitiny hořčíku vyráběných vysokotlakým litím, časopis Slévárenství 5-6/2015, ISSN 0037-6825
- [9] NOVÁ, I. MACHUTA, J. HORÁČEK, J: Increasing the Quality of the Production Steering Wheel Castings Using Simulation Calculations of Solidification, časopis Manufacturing Technology, September 2015, Vol. 15, No.4, ISSN 1213-2489

***Doktorská práce byla vypracována s podporou řešeného projektu
na FS - TU v Liberci: SGS 21122.***

3 Teoretický základ o slévárenství a simulacích

3.1 Slévárenství

Historie slévárenství je protkána mnoha úspěchy lidí, kteří se snažili neustále vyvíjet a zlepšovat technologie pro výrobu tvarově složitých dílů bez nutnosti dalšího zpracování.

Slévárenství je technologie spadající do oblasti využívané ve strojírenské technologii, označované jako strojírenská metalurgie. To však není jediná metoda, která je součástí strojírenské metalurgie. Zahrnuje i jiné metody jako například obrábění a montáž, svařování a jiné. Samotné slévárenství je definováno jako zpracování železných a neželezných kovů v tekutém stavu tak, že tavenina je vlévána nebo vtlačována do slévárenské formy, ve které dochází k procesu tuhnutí a chladnutí. Po zchladnutí získáváme výrobek označovaný jako odlitek, který je požadovaného rozměru a tvaru.

Při výrobě odlitků ve slévárenské formě dochází k poměrně složitým procesům přenosu tepla a hmoty za nestacionárních podmínek a současného průběhu fyzikálních, chemických i fyzikálně-chemických dějů. Je nutné si uvědomit, že pro řešení těchto složitých procesů je potřeba rozdělit soustavu odlitek - forma - okolí do jednotlivých částí a tyto jednotlivé části definovat matematicky. Dalším důležitým krokem při řešení dané problematiky je nadefinování časově závislých procesů sdílení tepla. Pod pojmem proces sdílení tepla, který je časově závislý proces, zahrnujeme tuhnutí a chladnutí odlitku. U procesu tuhnutí dochází k ději spojeným s přechodem materiálu odlitku z kapalné fáze na tuhounou fázi. Při tomto ději přeměny fází dochází k utváření krystalizační struktury a k přeměnám fyzikálních a mechanických vlastností. Kromě utvářející se struktury může docházet i k utváření vad odlitku či vzniku staženin a pórovitosti popřípadě může docházet k deformacím nebo vnitřnímu pnutí. To ovlivňuje kvalitu finálního produktu.

V současnosti se kvalita odlitků posuzuje ve větší míře jejich cenou. Zkušenosti v oboru jsou výrazně vyváženy cenou. Cenový boj má za následek rozdílné výsledky kvality stejného odlitku od dvou různých výrobců. To může být způsobeno použitými technologiemi nebo procesem použitým při odlévání.

U těchto procesů jsou základem tepelné děje, ke kterým dochází mezi odlitkem a formou. Odlitek se slévárenskou formou a případně okolím utváří vazbu, při které dochází k odvodu a akumulaci tepla.

Sledování tuhnutí odlitků ve slévárenské formě se stalo předmětem mnoha prací. V předešlých letech autoři publikací zaměřené na toto téma využívaly k těmto účelům celou řadu komerčních softwarů jako například MAGMA-SOFT, Novacast, PROCAST, Simtec, Solstar, Simulor, FLOW-3D Cast a jiné. Dnes se výčet zmíněných programů příliš neliší. Některé se stále využívají v aktualizovaných verzích jako například MAGMA, NovaFlow&Solid, PROCAST, nebo nové jako je například QuikCAST (využívaný při řešení této práce) nebo Sutcast, Finite Solutions Casting či EKKcapcast. S vyvíjející se výpočetní technikou se s nutností vyvíjejí i zmiňované programy a trh s těmito softwary se plní novými.

3.2 Tepelné děje při plnění a tuhnutí mezi odlitkem a formou

Tepelné poměry mezi taveninou (odlitkem) a slévárenskou formou lze popsat jako velice složitý proces sdílení a přenosu tepla. K procesům dochází mezi povrchy odlitku a formy, případně mezi odlitkem, mezerou a formou. U těchto procesů je zdrojem tepelné energie odlitek, který uvolňuje do formy (příjemce tepelné energie) tepelnou energii, která utváří při průchodu formou teplotní pole, která se s časem a polohou mění.

Tepelné děje při plnění a tuhnutí mezi odlitkem a formou se dělí na tři základní děje přenosu tepla. Jsou jimi **konvekce** jinak známá jako **proudění tepla**, **kondukce** známá jako **vedení tepla** a na závěr **radiace** též známa jako **sálání tepla**. V reálu se však nepotkáme s případy výskytu jednotlivých dějů sdílení tepla izolovaně, ale naopak s jejich kombinacemi.

3.2.1 Přenos tepla vedením (Kondukce)

Při sdílení tepla vedením dochází mezi částicemi k přímému styku a tím k přenosu kinetické energie (neuspořádaný tepelný pohyb), která se přenáší z míst vyšší teploty do míst o nižší teplotě látky. Vedením se teplo šíří především v tuhé fázi (příkladem může být odlitek a slévárenská forma), v kapalně fázi se předpokládá sdílení tepla vedením jen ve zvláštních případech, přesto k tomu může docházet stejně tak i v plynné fázi.

Základním vyjádřitelným vztahem pro sdílení tepla vedením je Fourierův zákon vedení tepla, který se dá formulovat jako hustota tepelného toku, jenž je úměrná zápornému gradientu teploty. Záporné znaménko udává směr šíření tepla od místa s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Pro trojrozměrné vedení tepla má pak **Fourierův zákon** tvar:

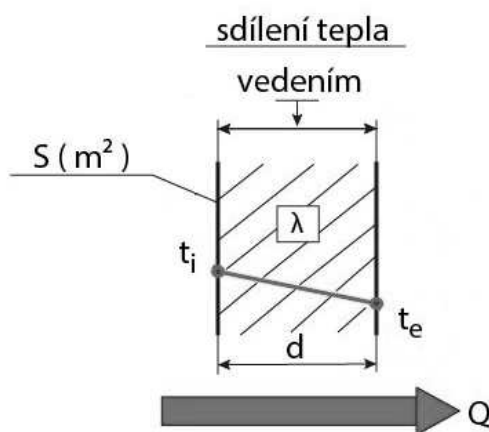
$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T = -\lambda \cdot \text{grad} T \Rightarrow \dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad} l \quad (1.1)$$

Kde je: $\dot{q}$ - hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$];

λ - součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

S - izotermická plocha kolmá k tepelnému toku [m^2];

Q - celkové množství tepla.



Obr. 1.1 Vedení tepla v rovinné stěně

Při řešení nestacionárního sdílení tepla u prostorových úloh nestačí určit pouze tepelný tok, ale je nutné vyřešit teplotní pole v dané oblasti. Hledá se tedy rozložení izoterm, které popisují teplotní pole. Pro matematický popis teplotního pole je využívána odvozená diferenciální rovnice vedení tepla (2.7), která je popsána v kapitole 3.2.6.

3.2.2 Přenos tepla prouděním (Konvekce)

Při přenosu tepla prouděním je teplo transportováno mezi fázovým rozhraním a hlavním proudem pohybující se kapaliny (taveniny) a to vedením v hraniční vrstvě a pohybem větších shluků molekul předávající teplo od hraniční vrstvy do vzdálenějších míst. Hustota tepelného toku pro přenos tepla vedením je vyjádřena z **Newtonova vztahu**:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot (T_F - T_O) \Rightarrow \dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_F - T_O) \cdot t, \quad (1.2)$$

Kde je: $\dot{q}$ - hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$];

Q - celkové množství tepla [J];

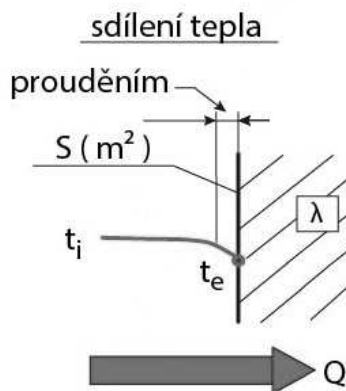
T_F - teplota povrchu formy [K];

T_O - teplota povrchu odlitku [K];

α - součinitel přestupu tepla dotykem [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$];

S - velikost teplosměnné plochy [m^2];

t - čas [s].



Obr. 1.2 Proudění tepla u rovinné stěny

Bereme-li v úvahu změnu teploty či jiné fyzikální veličiny v závislosti na čase a zároveň změny způsobené přemístěním elementu z jednoho bodu prostoru do jiného bodu, dostaneme vztah pro popis tepelných dějů v tavenině, který je vyjádřen diferenciální rovnicí (2.0) vedení tepla, která je popsána v kapitole 3.2.5. Proudění se uplatňuje při přenosu tepla v pískové slévárenské formě.

3.2.3 Přenos tepla sáláním (Radiace)

Sálání tepla je fyzikální proces, při kterém látka emituje do prostoru energii ve formě elektromagnetického vlnění, které se může šířit určitými vlnovými délkami. Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním se může prostřednictvím sálání teplo přenášet i ve vakuu, to znamená bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím. Každé látkové prostředí dokáže emitovat svou vlastní tepelnou energii a na základě toho se z něj stává tepelný zářič. Ideálním tepelným zářičem je absolutně černé těleso, u něhož lze vyjádřit množství vyzařené energie pomocí **Stefan-Boltzmanova zákona** (1.3). Ten říká, že intenzita vyzařované energie roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa. Rovnice má pak tento tvar:

$$E = \sigma \cdot T^4, \quad (1.3)$$

Kde je: E - vyzařovaná energie tělesa (černého) [W];

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$];

T - teplota [K].

Při dopadu či průchodu zářivé energie jiným tělesem se mění část energie zpět na tepelnou. Energie vyzařovaná tělesy prudce vzrůstá s teplotou a řídí se upraveným **Stefan-Boltzmanovovým zákonem** (1.4) s ohledem na vlastnosti skutečných těles.

$$E = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.4)$$

Kde je: C_0 - součinitel sálání dokonale černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

Ve skutečnosti je většina těles šedá. Šedým tělesem je označováno těleso pohlcující stále stejnou část na ně dopadající energie v celém pásmu vlnových délek. Do šedých těles můžeme zahrnout veškerá tuhá tělesa se zdrsňeným či okysličeným povrchem, který dosahuje velké poměrné pohltivosti. **Poměrná pohltivost** (1.5) nebo také emisní poměr je poměr energie vyzařované tělesem o teplotě T k energii absolutně černého tělesa při shodné teplotě.

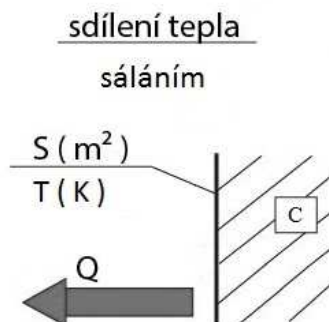
$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (1.5)$$

Na základě skutečností, lze množství vyzářené energie šedým tělesem vyjádřit rovnicí:

$$E_c = \varepsilon \cdot E = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.6)$$

Kde je: C - součinitel sálání šedého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$];

ε - emisní součinitel (experimentálně určený) [1].



Obr. 1.3 Sálání tepla u šedého tělesa

3.2.4 Kombinovaný přenos tepla

Základní děje přenosu tepla se nevyskytují samostatně. Mnohem častěji se setkáme s kombinací sdílení tepla **vedením a prouděním tepla** případně **sáláním a prouděním tepla** nebo i s kombinací všech třech dějů.

3.2.4.1 Kombinace přenosu tepla vedením a prouděním

Děj kombinující přenos tepla vedením a prouděním je označován jako **prostup tepla**. Prostup tepla je proces tepelné výměny mezi dvěma kapalinami oddělené pevnou rovinnou stěnou. Pokud tedy opět využijeme rovnici Fourierova zákona, která je upravena pro daný případ přenosu tepla, dostaneme pak rovnici pro prostup tepla tvaru:

$$Q = \frac{S \cdot \tau \cdot (t_i - t_e)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot S \cdot \tau \cdot (t_i - t_e), \quad (1.7)$$

Kde je: Q - celkové množství tepla [J];

S - velikost teplosměnné plochy [m^2];

τ - doba průchodu tepla [s];

t_i - teplota kapaliny 1 [K];

t_e - teplota kapaliny 2 [K];

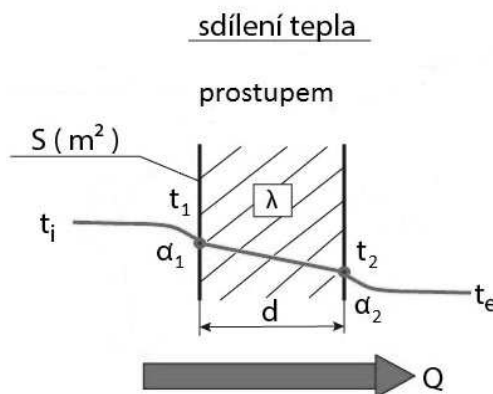
d - tloušťka stěny [m];

α_1 - součinitel přestupu tepla z kapaliny 1 do stěny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

α_2 - součinitel přestupu tepla ze stěny do kapaliny 2 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

λ - součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

k - součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].



Obr. 1.4 Kombinovaný přenos tepla - Prostup

3.2.4.2 Kombinace přenosu tepla sáláním a prouděním

Dochází-li k sálání a přenosu tepla prouděním mezi plynem a stěnou, pak je množství přeneseného tepla obecně dáno součtem rovnic, které jsou závislé různým exponentem na teplotě. To nám pak dává tvar rovnice:

$$Q = Q_k + Q_s = \alpha_k \cdot S \cdot (T_p - T_s) + \varepsilon \cdot C_o \cdot S \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right], \quad (1.8)$$

K zjednodušení výpočtu se druhý člen rovnice (1.8) přizpůsobí prvnímu a tím dostaneme rovnici:

$$Q = \alpha_k \cdot S \cdot (T_p - T_s) + \alpha_s \cdot S \cdot (T_p - T_s), \quad (1.9)$$

Kde je: α_k - součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

α_s - součinitel přestupu tepla radiací [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

T_p - teplota plynu [K];

T_s - teplota stěny [K].

3.2.5 Přenos tepla v tavenině

Teplo se v tavenině šíří pomocí kondukce a konvekce, proto je nutné brát v potaz změnu teploty v pohybujícím se elementu taveniny. Popis tepelných dějů v tavenině popisuje **Fourierova – Kirchhoffova diferenciální rovnice** vedení tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \nabla^2 T, \quad (2.0)$$

kde je: T - teplota [K];

a - součinitel teplotní vodivosti taveniny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

v_x, v_y, v_z - rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru souřadného systému [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

∇^2 - Laplaceův operátor;

t - čas [s].

Rovnice (2.0) obsahuje proměnnou teplotu a proměnnou rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru souřadného systému. Což znamená, že teplotní pole v proudící tavenině je závislé na rychlosti proudu. Prouděním taveniny vzniká tření,

které je nutné zahrnout při průchodu tepla taveninou. Je nutné si uvědomit, že sdílení tepla v tavenině není odvislé jen od tepelných dějů, ale také od hydrodynamických pochodů a to má za následek řešení více soustav diferenciálních rovnic. Pro plnění slévárenské formy taveninou lze využít **Navier-Stokesovu rovnici**:

$$\rho \cdot \underline{v}' + \underline{v} \cdot \text{div} \cdot (\rho \cdot \underline{v}) = \rho \cdot g + \text{grad} (p) + \nu \Delta \underline{v}, \quad (2.1)$$

kde je: ρ - hustota proudícího média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

$\underline{v}$ - rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

p - tlak [Pa];

ν - součinitel kinetické viskozity [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

Δ - Laplaceův operátor.

a podmínka kontinuity:

$$\text{div} \cdot \underline{v} = 0, \text{ resp } \text{div} \cdot (\rho \cdot \underline{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \quad (2.2)$$

pro nestlačitelnou kapalinu je rovnice kontinuity:

$$\text{div} \cdot \underline{v} = 0, (\rho = 0). \quad (2.3)$$

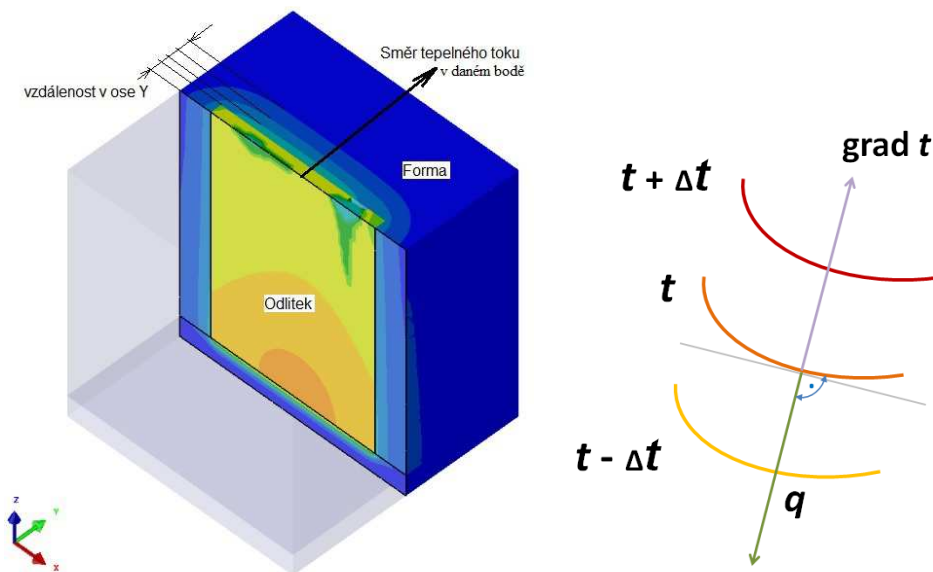
Samotný proces vzniku odlitku je fyzikálně velice složitý a to vzhledem k tomu, že dochází k přenosu tepelné energie při přeměně skupenství kapalné fáze (taveniny) na tuhou fázi v závislosti na čase.

3.2.6 Tuhnutí odlitku ve slévárenské formě

Tento přenos tepelné energie má za následek ochlazování taveniny a postupné utváření odlitku tedy tuhnutí odlitku. Pod pojmem tuhnutí odlitku rozumíme postup a usměrňenost krystalizačních vrstev tak, aby byla docílena homogenní struktura odlitku, která je nositelem jeho vlastností.

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, při průchodu tepelné energie formou dochází ke vzniku tepelných polí. Teplotní pole si můžeme představit jako rozložení izoterm (plochy spojující oblasti se stejnou teplotou) v daném časovém okamžiku. Ke změnám teplotních polí dochází na základě tepelného toku, který udává množství tepla prošlého danou plochou za určitý časový úsek. Směr tepelného toku (Obr. 1.5) je určen

kolmicí v každém místě plochy izotermie. Tvar izoterm kopíruje tvar tvořícího se odlitku.



Obr. 1.5 Rozložení teplotního pole u odlitku tvaru desky a formy

Schopnost slévárenské formy akumulovat teplo z tuhnoucího, popř. chladnoucího odlitku závisí nejen na materiálových podmínkách odlévané slitiny a formy, ale také na přestupu tepla mezi odlitkem a formou, nebo na výměně tepla mezi formou a okolím. Množství tepla, které je slévárenská forma schopna akumulovat se určí ze vztahu:

$$Q_F = V_F \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot T_{STR} \quad (2.4)$$

kde je: V_F - objem formy [m^3];

ρ_F - hustota formy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

c_F - měrná tepelná kapacita formy [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

T_{STR} - střední teplota formy [K].

K tuhnutí odlitku ve směru od líce formy dochází určitou rychlostí. Tuto rychlost lze posoudit na základě vzniklé tloušťky u tuhnoucí taveniny, která vznikne za jednotku času. Pro výpočet doby tuhnutí lze vycházíte z tepelné bilance odlitku a formy při tuhnutí:

$$dQ_O = dQ_F = dQ_{PR}, \quad (2.5)$$

kde je: dQ_O - přírůstek tepla uvolněného při tuhnutí odlitku [J];

dQ_F - přírůstek tepelné energie, kterou akumuluje forma [J];

dQ_{PR} - přírůstek tepla prošlého rozhraním odlitek – forma [J].

Celkové množství tepelné energie uvolněné odlitkem, který krystalizuje v intervalu teplot T_L a T_S , lze vypočítat:

$$Q_O = m_K \cdot \left[\int_{T_S}^{T_L} c_L \cdot dT + L_{KR} + \int_{T_S}^{T_{KO}} c_S \cdot dT \right], \quad (2.6)$$

Po integraci získáváme známý vztah:

$$Q_O = m_K \cdot [c_L \cdot (T_1 - T_L) + L_{KR} + c_S \cdot (T_S - T_{KO})], \quad (2.7)$$

kde je: m_K - hmotnost kovu [kg];

c_L - měrná tepelná kapacita taveniny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

c_S - měrná tepelná kapacita ztuhlé taveniny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

L_{KR} - latentní (krystalizační) teplo kovu [$J \cdot kg^{-1}$]

T_1 - teplota lití [K];

T_L - teplota počátku tuhnutí [K];

T_S - teplota konce tuhnutí [K];

T_{KO} - konečná teplota odlitku [K].

V tabulce 3.1 jsou uvedeny hodnoty důležitých tepelných veličin vybraných slévárenských materiálů využitých při řešení v této práci.

Materiál	Krystalizační teplo [$J \cdot kg^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	
		c_L	c_S
Čistý hliník (Al)	397 163	1289,5	896
Zinek (Zn)	112 206	502	385
Slitina AlSi12	513 335	1131	1080
Litina (LLG)	259 200	837,2	540
	299 200	729	544,2

Tab. 3.1: Hodnoty důležitých tepelných veličin vybraných slévárenských materiálů

Při sledování přenosových tepelných dějů je kromě rychlosti také velmi důležité určit dobu tuhnutí odlitku. Na řešení rychlosti a doby tuhnutí se zaměřili například CARSLAW [40], LIGHTFOOT [41], NEUMANN podle [28] nebo SCHWARZ [38],

kteří přispěli svými matematicko-fyzikálními řešeními. Známým řešením pro určení doby tuhnutí přispěl CHVORINOV [27]. Ten na základě experimentálních měření dokázal, že pomocí střední hodnoty konstanty tuhnutí lze vypočítat dobu tuhnutí odlitků konečných rozměrů o libovolné velikosti i libovolném tvaru. Také dospěl k poznatku, že na rychlost tuhnutí odlitku má vliv velikost a tvar odlitku. Poměr objemu odlitku ku povrchu odlitku je označován jako modul odlitku, který definuje velikost a tvar. Výpočet doby tuhnutí odlitku libovolné velikosti a tvaru je vyjádřen rovnicí (2.8).

$$t_{TUH} = \left(\frac{V}{\frac{S}{k}} \right)^2 = \left(\frac{M}{k} \right)^2 \quad (2.8)$$

Kde je: M - modul odlitku [m];

V - objem odlitku [m³];

S - povrch odlitku [m²];

k - konstanta tuhnutí.

Tuhnutí odlitku ve slévárenské formě, představuje nestacionární podmínky sdílení tepla, to lze řešit na základě **Fourierovy diferenciální rovnici sdílení tepla**:

$$\frac{\partial(\rho, c_v, T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (2.9)$$

Kde je: T - teplota [K];

t - čas [s];

ρ - hustota [kg.m⁻³];

c_v - měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹];

q_v - tepelný výkon vnitřních zdrojů [W];

λ_x, λ_y, λ_z - součinitelé tepelné vodivosti ve směrech x,y,z [W.m⁻¹.K⁻¹].

Fourierova diferenciální rovnice (2.7) je založena na základních fyzikálních zákonech a proto popis přenosu tepla v nejobecnější formě a jeho řešení vede k možnému zisku nekonečného počtu výsledků. Pro správnou volbu řešení odpovídající zkoumané problematice, je třeba matematicko-fyzikální formulace jeho zvláštností a to ve formě počátečních a okrajových podmínek, které musí splňovat řešení diferenciální rovnice.

Počáteční podmínka popisuje rozložení teploty v tělese v určitém časovém okamžiku ($t=0$). Pro trojrozměrné sdílení tepla má počáteční podmínka výraz:

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z)$$

V mnoha případech lze počáteční podmínku definovat tak, že v okamžiku $t = 0$ je teplota v tělese rovnoměrně rozložena, pak dostáváme výraz ve tvaru:

$$T(x, y, z) = T_0 = konst.$$

Okrajové podmínky zahrnují v první řadě geometrické a fyzikální charakteristiky sledovaných těles pak rozložení teplot v určitém časovém okamžiku a na závěr charakteristiku pochodu probíhajícího mezi zkoumaným tělesem a okolím. Jak je obecně známo, rozlišuje se 5 druhů okrajových podmínek:

Okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova)

to je podmínka, při které je zadáno rozložení teplot jako funkce místa a času na povrchu tělesa, což lze zapsat: $T_p = f(x, y, z, t)$, kde značí T_p - teplotu na povrchu tělesa. V zjednodušeném případě, který v reálných podmínkách téměř nenastává, se předpokládá: $T_p = konst.$

Okrajová podmínka II. druhu (Neumannova)

je podmínka, která uvažuje hustotu tepelného toku kolmo na povrch tělesa jako funkce času a místa: $q_p = f(x, y, z, t)$, kde značí q_p - hustotu tepelného toku.

K jednodušším případům definice této podmínky patří případ konstantní hustoty teplotního toku na povrchu: $q_p = konst.$ Zcela nejjednodušší a velmi častý je případ tepelně izolovaný povrch, kdy $q_p = 0$.

Okrajová podmínka III. druhu (Newtonova)

charakterizuje přestup tepla prouděním do okolí. Tepelný tok na povrchu tělesa je dán vztahem: $q_p = \alpha \cdot (T_p - T_0)$, kde značí T_p - teplotu povrchu, T_0 - teplotu okolí a α - součinitel přestupu tepla mezi povrchem a okolím jako funkci času a místa, ten zahrnuje vliv proudění a sálání tepla. Součinitel $\alpha = \alpha_{SAL} + \alpha_{KON}$.

Podmínka je splněna za předpokladu $\alpha_{KON} > \alpha_{SAL}$.

Je-li $\alpha_{SAL} \gg \alpha_{KON}$, pak okrajová podmínka III. druhu přechází v podmínku II. druhu.

Je-li $\alpha = \alpha_{SAL} + \alpha_{KON} = \infty$, okrajová podmínka III. druhu přechází v podmínku I. druhu.

Okrajová podmínka IV. druhu (Fourierova)

charakterizuje těsný styk dvou těles, v důsledku toho nedochází k teplotnímu spádu, v tom případě pak lze zapsat podmínku rovnosti tepelných toků:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)$$

Poměr teplotních gradientů povrchů těles zůstává konstantní a je určen poměrem tepelných vodivostí materiálů obou těles, za předpokladu dokonalého styku kontaktních ploch na úrovni fyziky.

Okrajová podmínka V. druhu

má uplatnění v konkrétních případech, kdy při ochlazování nebo ohřevu dochází k přeměně fází s časem v úzkém pásmu. Tato okrajová podmínka je jakýmsi rozšířením okrajové podmínky IV. druhu. Pakliže je množství vyzařovaného skupenského tepla při fázové přeměně tak velké, že prostředí není schopno dostatečně rychle přijímat nebo odvádět teplo z pásma fázové přeměny, pak dochází ke změně skupenství v úzkém pásmu. Pásmo přeměny se utváří určitou rychlostí, která se dá vyjádřit výrazem $w = d\xi/dt$. Na základě toho má pak rovnice tepelné bilance v pásmu fázové změny, přesněji řečeno podmínka V. druhu, tvar:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=\xi} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=\xi} = \xi + \frac{\rho \cdot L_{KR}}{dt} \frac{d\xi}{dt}.$$

Kde: Index 1 - Ztuhlý kov, Index 2 - Tavenina

Vezme-li se v úvahu, že se jedná o čistý tuhnoucí kov, pak označení ξ je tloušťka vrstvy ztuhlého kovu, zbylá část je tavenina. Tuto okrajovou podmínku lze uplatnit při řešení vedení tepla v tuhnoucí tavenině.

Pro aplikaci Fourierovy diferenciální rovnice při řešení teplotních polí v odlitku a slévárenské formě je třeba správně formulovat nejen počáteční a okrajovou podmínku, ale také nalézt správnou metodu řešení.

3.2.7 Tepelné procesy na hranici mezi odlitkem a formou

3.2.7.1 Těsný styk odlitku a formy

K tomuto procesu dochází mezi taveninou a formou, též k tomu může docházet i mezi odlitkem a formou. Tepelný proces je charakterizován těsným stykem obou těles. Intenzita výměny tepla mezi povrchem odlitku a formy za předpokladu jejich těsného dotyku je charakterizována Biotovým kritériem (Biotovým číslem) odlitku Bi_O a formy Bi_F , jehož tvar je:

Biotovo kritérium pro odlitek:

$$Bi_O = \frac{\Delta T_O}{\Delta T_F} = \frac{X_O}{\frac{\lambda_O}{\alpha_D}}, \quad (3.0)$$

Biotovo kritérium pro formu:

$$Bi_F = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_O} = \frac{X_F}{\frac{\lambda_F}{\alpha_D}}, \quad (3.1)$$

Kde je: ΔT_O - rozdíl teplot v odlitku ($T_{KR} - T_{pO}$);

ΔT_F - rozdíl teplot ve formě ($T_{pO} - T_F$);

X_O - charakteristický rozměr odlitku;

X_F - charakteristický rozměr formy;

λ_O - tepelná vodivost odlitku;

λ_F - tepelná vodivost formy;

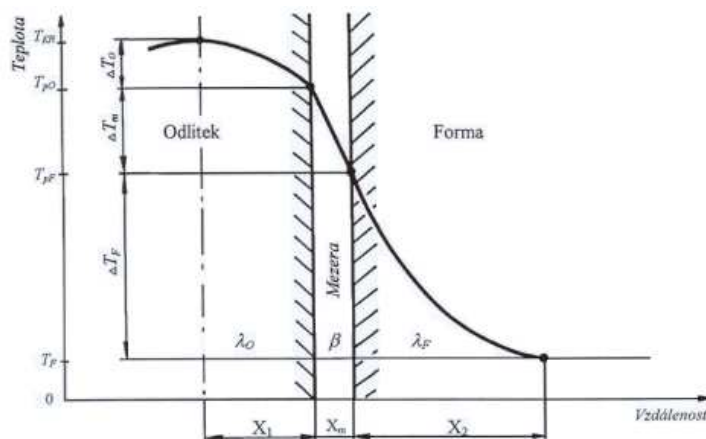
α_D - součinitel přestupu tepla mezi odlitkem a formou.

Biotovo číslo odlitku je vyjádřeno jako poměr tepelné propustnosti rozhraní a tepelné propustnosti tělesa odlitku, neboli jako poměr tepelného odporu odlitku a tepelného odporu rozhraní. Celkový součinitel přestupu tepla z povrchu odlitku do formy lze stanovit na základě součtu obou dílčích součinitelů přestupu tepla jak dotykem, tak sáláním: $\alpha = \alpha_D + \alpha_s$.

V případě kovové slévárenské formy při gravitačním lití, velmi často dochází mezi ztuhlou vrstvou odlitku a lícem formy ke vzniku vzduchové vrstvy, která vytváří tepelný odpor a tím ovlivňuje intenzitu sdílení tepla mezi odlitkem a formou.

3.2.7.2 Systém odlitek - mezeira - forma

Při rychlém ochlazování v kovové formě dochází ke smršťování odlitku, zároveň dochází ke změnám rozměrů formy při jejím ohřevu. To má za následek vznik plynové vrstvy mezi odlitkem a formou. Takto vzniklá plynová vrstva se stává nedílnou součástí mezery. Do mezery se zahrnuje nejen vytvořená plynová vrstva, ale také nátěr líce formy a oxidická vrstva odlitku.



Obr. 1.6 Rozložení teplotního v systému odlitek - mezeira - formy

Problematikou vzniku mezery se zabývali HAVLÍČEK [54] a VEJNÍK [31], kteří došli k závěru, že se mezery netvoří kolem celého povrchu odlitku, ale vznikají pouze na plochách kolmých na podélný směr odlitku, tzn. ve směru absolutního lineárního smrštění odlitku.

Jak již bylo zmíněno, mezeira vytváří z hlediska intenzity přenosu tepla přechodový tepelný odpor TPO . Tepelný přechodový odpor mezery TPO_M ovlivňuje součinitel prostupu tepla β . Pak lze psát:

$$TPO_M = \frac{1}{\beta}, \quad (3.2)$$

kde je: TPO_M - tepelný přechodový odpor mezery [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$];

β - součinitel prostupu tepla v mezeře [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Problematika přechodového odporu je v reálu o něco složitější, než jen tepelný přechodový odpor mezery. Těsně po odlití dochází mezi taveninou a kovovou formou k ustavení tzv. počátečního tepelného přechodového odporu $TPO_{Poč}$. Velikost $TPO_{Poč}$ je závislá hlavně na počáteční teplotě, kvalitě líce kovové formy a na jejím materiálu. Další složkou tepelného přechodového odporu, která utváří celkový odpor mezery a

kterou označujeme TPO_P je plynová vrstva. Ta vzniká právě v důsledku již zmíněného smršťování odlitku v důsledku rychlého ochlazení v kokile a zároveň dochází ke změnám rozměrů formy při jejím ohřevu. V neposlední řadě se stává součástí celkového tepelného přechodového odporu i složka od zoxidovaného povrchu odlitku TPO_{OV} . Na závěr složka, jež ovlivňuje TPO_M je nátěr nebo nástřík líce formy. Vzniklý tepelný přechodový odpor je označován TPO_N . Skladbou těchto jednotlivých složek dostaneme výraz pro tepelný přechodový odpor mezery TPO_M :

$$TPO_M = TPO_{POČ} + TPO_{OV} + TPO_P + TPO_N \quad (3.3)$$

Kde je: $TPO_{POČ}$ – počáteční tepelný přechodový odpor;

TPO_{OXID} – tepelný přechodový odpor způsobený oxidickou vrstvou povrchu odlitku;

TPO_{VZ} – tepelný přechodový odpor způsobený vzduchovou vrstvou;

TPO_N – tepelný přechodový odpor způsobený nátěrem nebo nástříkem líce formy.

Současně lze odvodit vztah pro výpočet součinitele prostupu tepla mezery β_M v závislosti na tloušťce mezery a součinitele tepelné vodivosti:

$$\beta_M = \frac{\lambda_M}{X_M} \quad (3.4)$$

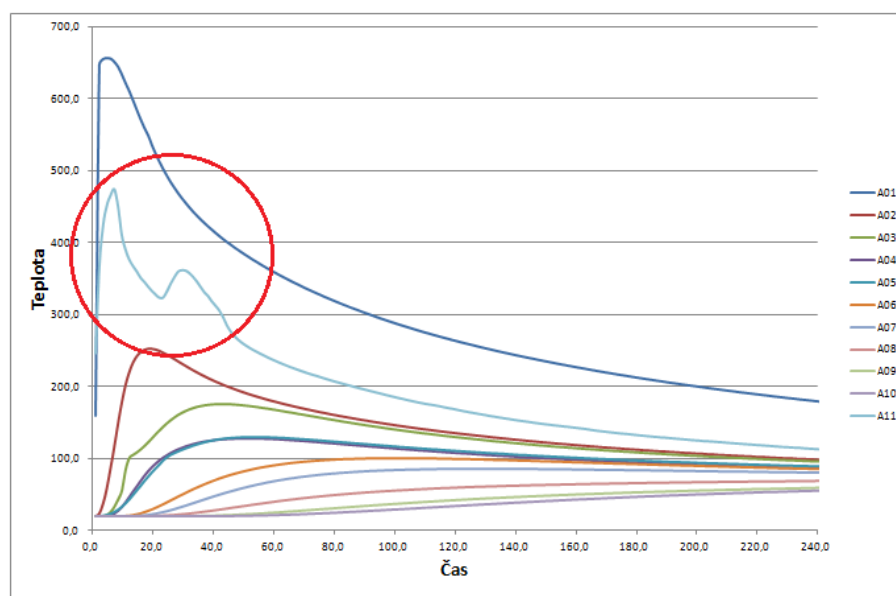
Kde je: λ_M – součinitel tepelné vodivosti mezery [$W.m^{-1}.K^{-1}$];

X_M – tloušťka mezery.

U oxidické vrstvy odlitku se teplo sdílí vedením (součinitel λ_{OV}). Ve vzduchové vrstvě se teplo sdílí kombinovaným způsobem vedením (λ_P) a sáláním (α_S). Konvekce se zde v důsledku tenké vzduchové vrstvy prakticky neuplatňuje.

Tepelný přechodový odpor u ocelářských kokil je ovlivněn i dalšími faktory jako jsou např. tepelné boky, kapacita, deformace tvaru kokily, dilatace vnitřního povrchu atd. Kokila se zpočátku v důsledku pnutí smršťuje a tím tlačí na odlitek, po prohřátí vnější stěny formy se ale uvolní, až začne dilatovat.

Mezera vzniká po určité prodlevě po odlití. Vliv vzniku mezery nebo spíše jejího tepelného přechodového odporu je natolik velký, že v okamžiku vzniku mezery dochází k dočasnému přerušení přenosu tepla sdílením z odlitku do formy. Projevuje se to navýšením povrchové teploty odlitku nebo prodlevou na stejné teplotě a výrazným poklesem teploty líce formy. Tyto projevy lze zpozorovat na výsledcích teplotních polí experimentů viz obrázek 1.7.



Obr. 1.7 Rozložení teplotního pole u odlitku tvaru desky a kokily

3.3 Tepelně-fyzikální veličiny slévárenských materiálů

Ne jen tepelné děje mezi formou a odlitkem jsou nutné k řešení dané problematiky, ale také samotné tepelně-fyzikální veličiny odlévaného materiálu.

Tepelně-fyzikální veličiny a jejich odpovídající hodnoty jsou důležité při řešení pomocí numerických simulačních výpočtů u tepelných procesů mezi odlitkem a slévárenskou formou, především pak pro tuhnutí a chladnutí odlitků. Tepelně-fyzikální vlastnosti lze podle charakteru rozdělit na:

Materiálové vlastnosti

- *Součinitel tepelné vodivosti (odlitku, formy): $\lambda_O, \lambda_F [W.m^{-1}.K^{-1}]$*
- *Měrná tepelná kapacita (odlitku, formy): $c_O, c_F [J.kg^{-1}.K^{-1}]$*

Vlastnosti odvozené z teorie přestupu tepla

- *Součinitel teplotní vodivosti (odlitku, formy): $a_O, a_F [m^2.s^{-1}]$*
- *Součinitel tepelné akumulace formy: $b_F [W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$*

Veličiny mění svojí velikost se změnou teploty a skupenství. Jelikož se jedná o poměrně složité matematické vyjádření závislosti na teplotě je snaha řešit tyto veličiny za pomoci experimentů v určitých tepelných intervalech. A dnes i v neposlední řadě pomocí výpočetní techniky a softwarů tomu určených. Mezi veličiny ovlivňující tepelné procesy v soustavě odlitek, forma lze zařadit součinitel přestupu, prostupu tepla α, β a hustota materiálu ρ .

3.3.1 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost je tepelně-fyzikální veličina látky, která charakterizuje její schopnost vedení tepla ve směru tepelného spádu. Je závislá na teplotě, tlaku a chemickém složení dané látky. Součinitel lze definovat jako množství tepla, které projde za jednotku času (1s) jednotkovou plochou izotermického povrchu ($1m^2$), přičemž v tělese je jednotkový teplotní gradient (1K). Konstanta úměrnosti představuje tepelnou vodivost, kterou lze popsat vztahem:

$$\lambda = \frac{|q|}{|\text{grad}T|} = \frac{Q \cdot \delta}{S \cdot t \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (3.3.0)$$

kde je: λ - součinitel tepelné vodivosti [$W.m^{-1}.K^{-1}$];

Q - množství tepla [J];

t - čas [s];

S - velikost teplosměnné plochy [m^2];

δ - tloušťka protékané vrstvy [m];

$(T_1 - T_2)$ - rozdíl teplot na povrchu ploch [K].

Velikost součinitele je odvislá od chemického složení a druhu materiálu. Dále pak od skupenství a struktury látky od teploty materiálu a od fyzikálního stavu (např. tlak). K určení součinitel tepelné vodivosti se využívá experimentálních metod. Metody se liší podle zkoumané látky (např.: laserová metoda, metoda horké desky, metoda odporová, atd.). Nehledě na využívané experimentální metodě, k určení součinitele tepelné vodivosti, je nutné znát hustotu tepelného toku q , nebo spíše řečeno tepelný tok P , který prochází zkoumanou látkou. Zároveň je nutné znát teplotní spád na povrchu ploch. U většiny látek je tepelná vodivost závislá na teplotě. Některé látky, ale mohou mít tepelnou vodivost závislou na teplotě, jež je lineární a v tom případě, lze napsat výraz:

$$\lambda = \lambda_0(1 + B \cdot T), \quad (3.3.1)$$

kde je: λ_0 - tepelná vodivost při teplotě 0°C [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

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

B - materiálová konstanta [K^{-1}].

Tepelná vodivost je u pevných látek nejvyšší a s každou změnou skupenství se mění směrem dolů od pevné po plynnou fázi. Pro potřeby řešení ve slévárenství jsou relevantní velikosti tepelné vodivosti pro kovy. U kovů je tepelná vodivost obecně vyjádřena superpozicí vodivosti prostorové mřížky pevného kovu a tepelných vibrací volných elektronů:

$$\lambda = \lambda_m - \lambda_e, \quad (3.3.2)$$

kde je: λ_m - tepelná vodivost prostorové mřížky [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

λ_e - tepelná vodivost tepelnými vibracemi volných elektronů [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Na základě toho lze vysvětlit rozdílné hodnoty tepelné vodivosti pro různé druhy kovů a slitin. Tepelná vodivost je nejvyšší u čistých kovů je vyšší než u jejich slitin. Vysvětlením je nehomogenita krystalické mřížky a tím zhoršený přenos tepelné energie.

Nehomogenita mřížky je způsobena příměsí cizích atomů, jež způsobují nepravidelnost mřížky a sníženou hodnotu tepelné vodivosti. Dalším prvkem, jenž ovlivňuje přenos tepelné energie je uhlík. Ten s rostoucím množstvím snižuje hodnotu tepelné vodivosti. Výjimkou jsou austenitické oceli u kterých s rostoucí teplotou roste λ .

V tabulce 3.2 jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti λ vybraných slévárenských materiálů, které se využívají při řešení v této práci.

Materiál	Teplota [°C]	Tepelná vodivost λ [W.m⁻¹.K⁻¹]
Čistý hliník (Al)	0 - 600	270 - 210
Zinek (Zn)	0 - 400	110 - 90
Slitina AlSi12	0 - 590	170 - 139
Minerální vlna	0 - 600	0,06 - 0,165

Tab. 3.2: Hodnoty tepelné vodivosti vybraných slévárenských materiálů

U ocelí výrazně snižuje hodnoty λ , zvyšující se procento obsažených legur (C, Ni, Cr, atd.). Z toho důvodu je nutné zaručit pomalé chladnutí u vysokouhlíkových a legovaných ocelí, aby se zabránilo vzniku poruch, které mohou nastat při rychlých změnách teplot.

U grafitických litin opět platí podmínka uhlíku, jenž snižuje hodnotu tepelné vodivosti, ale i tak se zde objevuje výjimka. Jestliže se uvažuje o grafitu jako o samostatném prvku, může být považován jako tepelný vodič. To vede k závěru, že srovnatelné matrice litiny o různé hustotě grafitu mají rozdílnou tepelnou vodivost (s hrubším grafitem je vyšší a s jemnějším grafitem nižší).

Nezvyklým případem z hlediska určování součinitele ve slévárenství se stávají pískové formy. Z hlediska porosity pískové formy je nutné brát tepelnou vodivost jako souhrn složek z vodivosti skeletu a vodivosti vzduchu obsaženého v pórech. Při vyšších teplotách je nutné brát v potaz proudění tepla u plynů a par mezi zrn a při zvýšených teplotách sálání tepla v pórech. U skeletu dochází k tepelné vodivosti pomocí přenosu tepla přes kontakty jednotlivých zrn ostřiva obsažených ve formovací směsi. A právě při průchodu tepla přes hranice zrn dochází ke vzniku tepelného odporu, tím dochází k poklesu tepelné vodivosti v porovnání s kompaktnějším materiálem. To vede k tvrzení,

že s rostoucí měrnou hmotností materiálu, roste jeho tepelná vodivost. Ke zvětšení tepelné vodivosti může přispívat zvětšování pórovitosti nebo i pojivo obsažené ve formovací směsi, které zvětšuje kontaktní plochu při průchodu tepla u zrn.

3.3.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je tepelně-fyzikální veličina látky, která představuje množství tepla, které musíme do látky dodat, abychom 1kg této látky ohřáli právě o 1K. Tato veličina je vyjadřována vztahem:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}, \quad (3.3.3)$$

kde je: m - hmotnost látky [kg];

dQ - přírůstek tepla [J];

dT - změna teploty [K].

Měrné tepelná kapacita látek se mění s teplotou podle výrazu:

$$c = A + BT + CT^2, \quad (3.3.4)$$

kde je: A, B, C - materiálové konstanty

T - Teplota

Veličina c je také závislá na skupenském stavu látky. Hodnoty kapacit, pro pevný a tuhý stav, lze při teplotě tavení, určit pomocí následujícího výrazu:

$$c_{tek} - c_{tuh} = \frac{L_{KR}}{T_t}, \quad (3.3.5)$$

kde je: c_{tek} - měrná tepelná kapacita látky ve skupenství kapalném [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

c_{tuh} - měrná tepelná kapacita látky ve skupenství tuhém [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

L_{KR} – latentní krystalizační teplo [$J \cdot kg^{-1}$];

T_t - teplota tání materiálu [K].

Podle hodnoty měrné kapacity je možné posoudit, jakou rychlostí dojde k ohřátí látky. Tudíž čím vyšší je hodnota c , tím pomaleji se látka ohřívá a naopak.

Měrné tepelné kapacity se rozlišují dvě v závislosti na probíhajícím ději a to měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku c_p nebo za stálého objemu c_v . Právě u slévárenských dějů, jsou tlakové poměry poměrně neměnné, proto mají význam především hodnoty c_p .

3.3.3 Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti je tepelně-fyzikální veličina, která má v podstatě stejný význam jako součinitel tepelné vodivosti, pouze s tím rozdílem, že součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje stejnou vodivost při neustálených tepelných dějích.

Při nestacionárních tepelných dějích se neustále mění entalpie těles. Rychlost změny této entalpie je přímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti tělesa a nepřímo úměrná akumulačním schopnostem tělesa, pak je rychlost tepelného děje při nestacionárním průtoku tepla závislá na jeho součiniteli teplotní vodivosti a . Jednoduše popisuje rychlost změny teploty na povrchu tělesa. Čím vyšší je hodnota a , tím rychleji dochází k vyrovnání tepla povrchu s vnitřkem tělesa.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad (3.3.6)$$

kde je: a - součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

λ - součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

ρ - hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

c - měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

U kovů je tento součinitel teplotní vodivosti větší než v porovnání s nekovy. Při úvahách o hodnotě součinitele teplotní vodivosti materiálů je třeba dbát na nepřímou úměrnost hustoty materiálu, která je velmi odlišná a hodnotu součinitele a značně ovlivňuje.

Fyzikální veličiny charakterizující součinitel teplotní vodivosti jsou veličiny λ, ρ, c , které závisí na teplotě. Tím se hodnota součinitele teplotní vodivosti stává závislou na teplotě také. Jak již bylo zmíněno, hodnota součinitele tepelné vodivosti v mnoha případech klesá a naopak měrná tepelná kapacita s teplotou stoupá. Na základě toho lze říci, že s rostoucí teplotou dochází k postupnému snižování hodnoty a .

3.3.4 Součinitel přestupu tepla

Jedná se o tepelně-fyzikální veličinu vyjadřující množství tepla přestupujícího za jednotku času jednotkou povrchu při teplotním spádu 1K mezi oběma tělesy. Součinitel přestupu tepla α je mírou intenzity přestupu tepla z teplejšího do chladnějšího prostředí.

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T \cdot dS, \quad (3.3.7)$$

kde je: dQ - přírůstek tepla [J];

α - součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

ΔT - změna teploty [K];

dS - diferenciál plochy [m^2].

Z výrazu (3.3.7) je zřejmé, že součinitel přestupu tepla lze z rovnice vyjádřit ve tvaru:

$$\alpha = \frac{dQ}{dS \cdot \Delta T} \quad (3.3.8)$$

Samotný součinitel je dosti výrazně ovlivňován charakterem sdílení tepla. V okamžiku těsného styku dvou těles dochází k přestupu tepla kombinací vedení a proudění. Velikost součinitele přestupu tepla je pak vyjádřena komplikovanou funkcí, tvořenou z mnoha faktorů, jimiž jsou: rychlosti proud taveniny, teplota tekutiny a stěny, vodivost, měrné teplo, hustota, dynamická viskozita, tvar a rozměr tělesa, velikost kontaktních ploch a hodnota tlaku. Při vzniku mezery mezi odlitkem a slévárenskou formou, která vznikne v důsledku odlehnutí ztuhlé vrstvičky odlitku od líce formy, dochází k přestupu tepla z odlitku do formy pomocí sálání, což vede k zahrnutí také součinitele přestupu tepla pro sálání. Při výpočtech přestupu tepla v okamžiku vzniku mezery je využívána jakási efektivní hodnota, která nahrazuje určitou kombinaci dvou součinitelů přenosu tepla. Jedním je součinitel přestupu tepla pro dotyk α_d a druhým je pro sálání α_s .

3.3.5 Součinitel prostupu tepla

Sdílení tepla z odlitku do slévárenské formy s použitím součinitele přestupu (α), resp. u kovových forem pro gravitační lití, **prostupu tepla** (β) se zpravidla vyjadřuje výrazem:

$$\beta = \frac{\lambda_{OV}}{X_{OV}} + \frac{\lambda_{PV}}{X_{PV}} + \frac{\lambda_N}{X_N} + \frac{\lambda_F}{X_F} + \alpha_{F-O}, \quad (3.3.9)$$

kde je: X_{OV} - tloušťka oxidické vrstvy [m];

X_{PV} - tloušťka plynové vrstvy [m];

X_N - tloušťka nátěru [m];

X_F - charakteristický rozměr formy [m];

α_{F-O} - součinitel přestupu tepla mezi formou a okolím [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$];

λ_{OV} , λ_{PV} , λ_N , λ_F - tepelné vodivosti oxidické vrstvy, plynové vrstvy, nátěru a formy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

3.3.6 Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy

Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy b_F celkově charakterizuje ochlazovací účinek skutečné formy vůči odlitku. Součinitel tepelné akumulace je závislý na tvaru a materiálu odlitku a jeho hodnotu lze určit z výrazu:

$$b_F = \sqrt{\lambda_F \cdot c_F \cdot \rho_F}, \quad (3.4.0)$$

kde je: λ_F - součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$];

ρ_F - hustota [$kg \cdot m^{-3}$];

c_F - měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Akumulační schopnost materiálu můžeme chápat jako množství tepla, jež materiál pojme jednotkou plochy za jednotku času při změně teploty o 1K. Dá se to vysvětlit na reálném příkladu tak, že pokud jsou vedle sebe dvě tělesa o stejné teplotě, ale tato teplota je nižší než tělesná teplota. Pak po doteku těles rukou se zdá, že těleso s vyšší akumulační schopností je studenější.

Součinitel tepelné akumulace lze stanovit třemi způsoby:

Vypočítáním velikosti součinitele tepelné akumulace b_F na základě výrazu (3.4.0). Výsledná hodnota, ale neodpovídá skutečnému stavu, protože při řešení bere v úvahu pouze hodnoty λ_F , ρ_F , c_F . Tím se zanedbávají podmínky, ke kterým dochází v soustavě odlitek slévárenská forma.

Metodou elektrické analogie a numerické metody. Takto získaná hodnota součinitele tepelné akumulace slévárenské formy je velmi přesná. Při zjišťování hodnoty součinitele, musí být brán zřetel na správné určení počátečních okrajových podmínek a koeficientů. Vybrané metody s sebou nesou značné nároky na použité vybavení.

Experimentální metodou přímou a nepřímou. Jedná se o zkoušky relativně jednoduchého provedení, které zohledňují dané slévárenské podmínky. Mezi zkoušky můžeme zahrnout nejstarší a nejjednodušší metodu vylévací. Dále pak metodu natuhávání kovu na vzorku materiálu slévárenské formy, metodu kalorimetrického měření a metodu stanovení b_F z teplotního pole formy.

3.4 Fyzikální veličiny odlévaného materiálu

Dalšími důležitými vlastnostmi při řešení dané problematiky jsou fyzikální vlastnosti kovů a jejich slitin. Základy fyzikálních vlastností se opírají o stavbu atomů kovu, tudíž mají stálou velikost.

Čisté kovy mají za normálních podmínek stále stejnou velikost fyzikálních vlastností. Ke změně může dojít je za předpokladu, že dojde k znečištění nebo příměsí jiného prvku. U slitin závisejí fyzikální vlastnosti na samotném složení slitiny. Slitiny se dvěma a více prvky jsou z hlediska fyzikálních vlastností popisovány jako funkce složení slitiny nebo jako obsah některého kovu v slitině.

Fyzikální vlastnosti, jež charakterizují chování odlévaného kovu, a které výrazným způsobem ovlivňují celý proces tuhnutí a chladnutí odlitku, jsou:

1) Měrná hmotnost ρ (hustota) [kg.m⁻³]

je hmotnost látky obsažené v objemové jednotce. Měrná hmotnost, u technických kovů, závisí na složení, čistotě (jelikož nečistoty hustotu snižují) a na způsobu zpracování. U kovů měrná hmotnost klesá plynule s rostoucí teplotou až do natavení, při natavení pokračuje pokles hustoty skokem.

2) Měrná tepelná kapacita v tuhém stavu c_s [J.kg⁻¹.K⁻¹]

udává množství tepla, jímž se ohřeje 1kg tuhé látky o 1K.

3) Měrná tepelná kapacita v kapalném stavu c_L [J.kg⁻¹.K⁻¹]

udává množství tepla, jímž se ohřeje 1kg tekuté látky o 1K. Stejně jako u předešlé měrné kapacity, rozdíl je pouze ve skupenství látky.

4) Latentní krystalizační teplo L_{KR} [J.kg⁻¹]

je teplo, které je zapotřebí odvést 1kg kovu, tak aby změnil své skupenství. Toto teplo ovlivňuje celkové množství odvedeného tepla z odlitku do slévárenské formy.

5) Kinematická viskozita ν [m².s⁻¹]

udává míru tekutosti kapalné fáze. S klesající teplotou viskozita roste, čímž se zhoršuje zabíhavost. Lze ji vyjádřit pomocí výrazu:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Kde je: η - dynamická viskozita kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$];

ρ - měrná hmotnost kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

6) Teplota krystalizace T_{KR} [K], [°C]

udává teplotu, při níž dochází ke změně skupenství.

7) Teplota lití T_{L} [K], [°C]

udává teplotu nataveného kovu těsně před okamžikem lití. Oproti T_{KR} je navýšena o míru přehřátí taveniny.

3.5 Simulační výpočty

V posledních letech, rychlost výpočetních procesů na PC výrazně vzrostl, to má vliv na délku simulačních výpočtů, které se zkracují ze dnů na hodiny. Právě simulační výpočty poskytují pohodlný a okamžitý přístup k výsledkům vědeckého výzkumu a analýzám. A právě proto CAE (Computer-aided Engineering) aplikace neustále nabývají na významu ve všech oblastech vývoje. Platí to zejména pro simulaci lití stejně jako pro tepelné zpracování. V dnešní době je simulace lití důležitým nástrojem pro optimalizaci výroby ve slévárně a velkou měrou se podílí na technologickém pokroku vývoje. Produkty vyrobené litím jsou navrženy s důrazem na funkční požadavky výrobku. Vyladování a obvyklé úpravy konstrukce odlitku, omezují výrobní proces a prodlužují samotný vývoj výrobku, proto se zde začalo využívat simulačních výpočtů, které tato omezení výroby zkracují. Kvalita analýzy CAE se výrazně zlepšila, a proto znalost chování odlévaného materiálu může být výhodou v raných fázích návrhu.

Výhody simulace v počátečním stádiu vývoje, jsou zřejmé. Pouze pomocí simulace výrobního procesu je možné rozhodnout o nehomogenním rozdělení mechanických vlastností (tvrdost, tažnost a mez kluzu). Souhrn mechanických vlastností je nutné zvážit při procesu návrhu optimalizace včetně tepelně-fyzikálních vlastností, zejména u FEM výpočtů. Jednou z možností simulace lití pomocí FEM jsou jednoduché výpočty tuhnutí a proudění taveniny. Dalšími možnostmi pak mohou být náročnější simulace, jako je mechanické namáhání a kombinace tepelných a mechanických výpočtů.

Na našem pracovišti - Katedra strojírenské technologie, oddělení strojírenské metalurgie se zabýváme simulačními výpočty tepelných dějů mezi odlitkem a formou. K tomuto účelu sloužil simulační program QuikCAST (verze 2010 a 2011). Kvalita simulačních výpočtů závisí na typu použitého matematického modelu v simulačním programu a na kvalitě a obsáhlosti databáze tepelně-fyzikálních veličin materiálů pro odlitky a slévárenskou formu. Na našem pracovišti byla vyvinuta metodika, kdy jsou nejdříve prováděna experimentální měření a následně prováděny simulační výpočty s odlitky jednoduchých tvarů.

Program QuikCAST je jednodušší verzí program ProCAST, který je určen k velice rychlým výpočtům a optimalizaci fáze plnění a tuhnutí odlitku včetně predikce

slévárenských vad. Tímto programem se dají řešit všechny základní slévárenské technologie jako například tlakové lití, gravitační lití a jiné.

3.5.1 CAE - Computer-aided engineering

CAE (Computer-aided Engineering), jedná se o počítačovou analýzu, která zahrnuje analýzu součástí, strojů či mechanismů. Součástí CAE analýz mohou být i simulace, ověřování a optimalizaci odlitků a jejich odlévání. Nástroje CAE se stali důležitou součástí při vývoji a konstrukci nových výrobků, v našem případě při konstrukci a plánování výroby odlitků a forem pro odlitky. V minulosti se označení CAE využívalo v širším slova smyslu. V současnosti se označení CAE využívá jen pro analytické nástroje. K analýzám životních cyklů výrobků se využívá pojem PLM (Product Lifecycle Management) nebo CAx. I přes pokročilost simulačních výpočtů, PLM analýzy mají nedostatky, jelikož popis okrajových podmínek je příliš rozsáhlý a náročný.

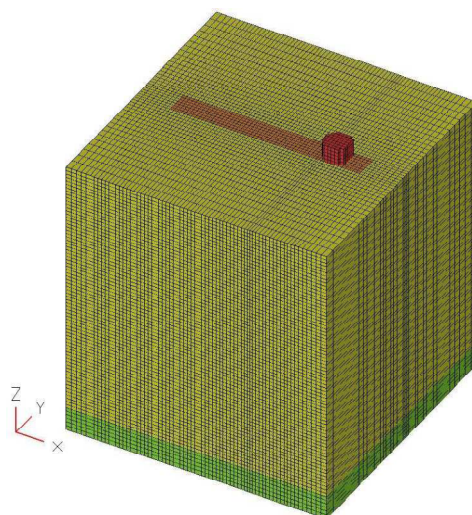
Oblasti, které pokrývají nástroje CAE, zahrnují:

- *Výpočet napětí součástí a sestav pomocí FEA (Finite Element Analysis)*
- *Analýza proudění a prostupu tepla pomocí nástrojů CFD (Computational fluid dynamics) Kinematika;*
- *Simulace mechaniky (MES)*
- *Modelování chování (BMX)*
- *Analytické nástroje pro simulování výrobních procesů jako je odlévání, tváření nebo lisování.*

Obecně se každé řešení CAE skládá ze tří fází:

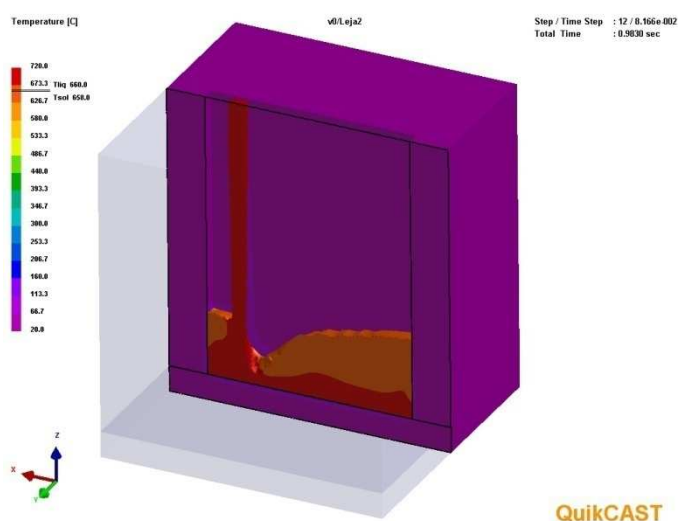
První fáze je **Pre-processing**,

definice součásti nebo sestavy modelu a jeho parametrů prostředí jako je například definice sítě modelu MKP, zatížení, vetknutí modelu a v neposlední řadě parametry materiálu. Je možné se také setkat s označením *Pre-procesor* což je počítačový program, který zpracovává vstupní data tak, aby výstup mohl být dále zpracován jiným programem.



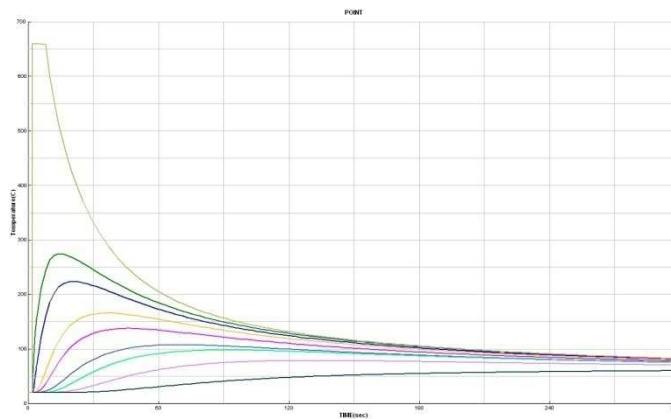
Obr. 1.8 Pre-processing zkoumaného modelu odlitku a formy.

Druhá fáze je **Analysis solver**, která je spíše známá jako **Processing**, jedná se o řešení výstupních dat z pre-processingu definovanými analýzami a uložení dat v podobě výsledků, na něž je možné navázat třetí závěrečnou fází.



Obr. 1.9 Processing - simulace procesu lití a tuhnutí.

Třetí fáze je **Post-processing**, poslední fáze v CAE procesu, ve které se zpracovávají získané výsledky. Obvykle za použití vizualizačních nástrojů, což opět může být další z mnoha počítačových softwarů, které dokáží zpracovat výsledná data. Výsledná data mohou být dále prezentována ve formě obrázků, videí a dalších formách výstupů.



Obr. 2.0 Post-processing - vizualizace výsledků ze simulací.

3.5.2 Numerické výpočty používané v simulačních programech

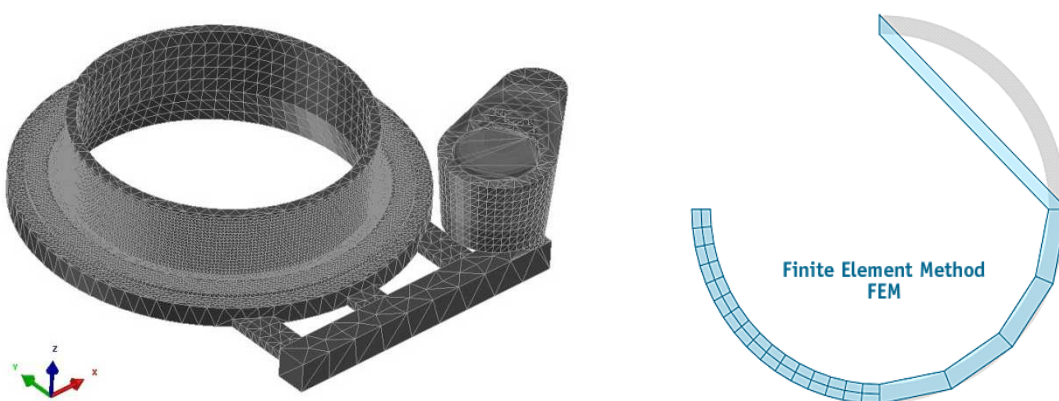
Základem výpočtů je řešení parciálních diferenciálních a integrálních rovnic. Vyrůstající výkon počítačů umožnil posun od simulací založených na zjednodušujících předpokladech a metodách, většinou proveditelných jen pro geometricky jednoduchá tělesa k simulacím složitých geometrických objektů a při plných okrajových podmínkách, které odpovídají realitě.

U numerických výpočtů se diskrétními hodnotami v daných bodech nahrazuje spojitá informace. Za pomoci diskretizace řešených veličin a oblastí se nahrazují diferenciální rovnice, jejichž přesné řešení v mnoha případech není možné jednoduchými algebraickými rovnicemi. K provedení diskretizace je nutné znát diskretizační rovnice, které obsahují časovou i prostorovou diskretizaci. To je algebraický výraz, který udává vzájemnou vazbu mezi hodnotami vyšetřované veličiny, pro určitou skupinu uzlových bodů. Na základě výchozích předpokladů a zvolené numerické metodě lze odvodit z jedné diferenciální rovnice celá řada různých diskretizačních rovnic. Musí však platit, že všechny rovnice dají stejné řešení, poroste-li počet uzlových bodů v limitě k nekonečnu. Numerické metody umožňují popis jakéhokoliv tvarově složitého modelu. Mezi nejpoužívanější numerické metody využívané pro modelování slévárenských procesů patří: Metoda konečných prvků a Metoda konečných diferencí nebo Metoda konečných objemů.

3.5.2.1 Metoda konečných prvků (MKP)

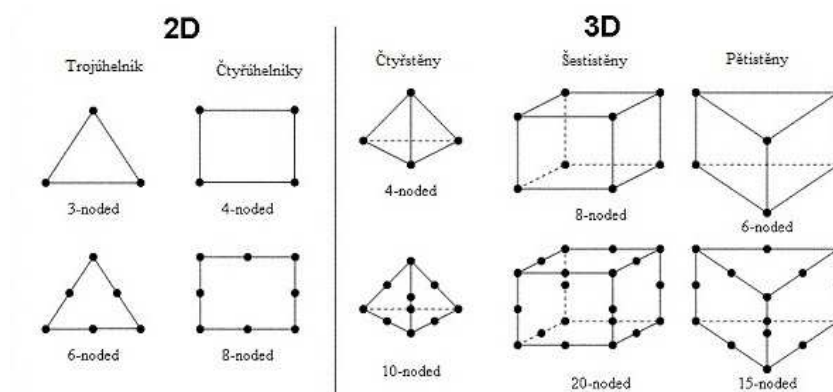
Největší význam mezi přibližnými numerickými metodami má dnes MKP (Metoda konečných prvků), můžeme se setkat s anglickým označením FEM (obr. 2.1) nebo také

FEA (Finite element analysis). V minulosti se používala tato metoda pro řešení strukturálních výpočtů. Dnes je tato metoda využívána i pro jiné typy výpočtů, jako je například prostup tepla a analýza teplotních, elektrických a magnetických polí. FEM nebo také metoda sítí řeší úlohy stacionární i nestacionární.



Obr. 2.1 FEM - Metoda konečných prvků (Finite Element Method)

MKP je založena na principu rozdělení pracovního prostoru na konečný počet elementů různých tvarů jako jsou trojúhelníky či čtyřúhelníky, které se využívají při plošných analýzách nebo při objemových analýzách se můžeme setkat s elementy tvaru šestistěnu či trojbokého jehlanu. Tyto elementy jsou mezi sebou propojeny v konečném počtu uzlových bodů, které se nacházejí ve vrcholech těchto elementů (na hranicích prvků).



Obr. 2.2 Tvary elementů pro plošné i objemové analýzy

Počet a tvar prvků je odvislý od typu oblasti. Na každém elementu se řešení interpoluje pomocí tvarových funkcí, které udávají i počet uzlů v jednom elementu (jedna tvarová funkce odpovídá jednomu uzlu). Tvarové funkce spolu s uzly udávají typ elementu.

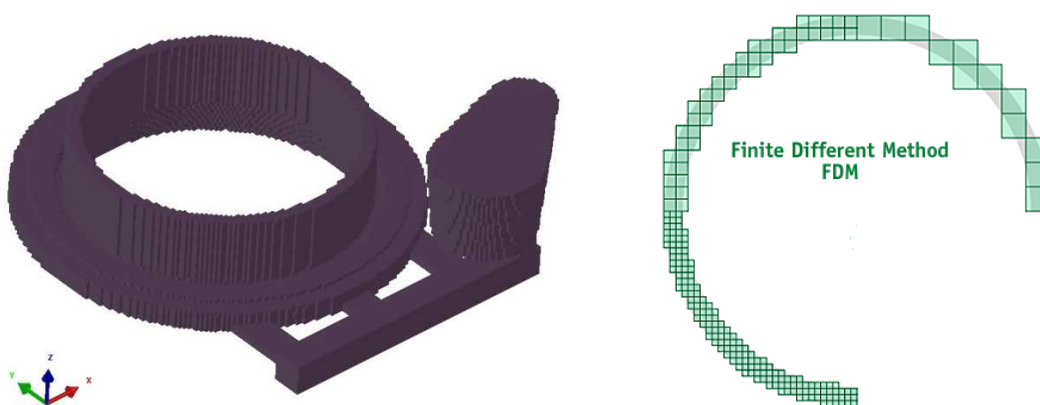
Všechny elementy v oblasti musí být stejného typu (existují i varianty kde se používá více typů elementů).

Skutečný průběh vyšetřované fyzikální veličiny se při řešení aproximuje zvolenou funkcí, přičemž je nutné, aby tato funkce byla jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech (3.4.1). Dříve byl nevýhodou složitý tvar a následná složitá síť, která měla za následek náročnost výpočtu, to je však v dnešní době vyřešeno pokrokem ve výpočetní technologii.

Aproximace řešení u pro $f(u)$ váženou sumou bázových funkcí:

$$\hat{u} = \sum_{j=1}^M \overbrace{\hat{u}_j}^{\text{neznámé koeficienty}} \cdot \overbrace{N_j(x)}^{\text{bázové fce}} \quad (3.4.1)$$

3.5.2.2 Metoda konečných diferencí (MKD)



Obr. 2.3 FDM - Metoda konečných diferencí (Finite Differences Method)

Metoda konečných diferencí (MKD) někdy označovaná jako metoda sítí, je založena na nahrazení řešené oblasti sítí, která se skládá z konečného počtu uzlových bodů. Jelikož se relativně snadno programuje, využívá se tato metoda zejména pro nelineární matematické modely. Nevýhodnou je problematická definice okrajových podmínek u rozdílně hustých sítí, sítí s různým odstupem uzlů a nutnost krátkého časového kroku. Každá geometrie je nejprve rozdělena na síť, která je tvořena skupinou samostatných bodů v určité oblasti. V této oblasti se následně hledá řešení diferenciálních rovnic s příslušnými okrajovými podmínkami. Přesnost řešení spočívá v nahrazování derivace přesnějšími výrazy. Náhrada se provádí v diskretních místech tvořených uzly sítě, které zahrnují zkoumanou oblast.

Používané tvary sítě mohou být obdélníkové, válcové, kulové, kosoúhlé nebo toroidní sítě. Ty jsou tvořeny uzly, které rozdělujeme na vnitřní a hraniční uzly. Výchozím bodem metody MKD je časově závislé rozdělení teploty, které je popsáno diferenciálními rovnicemi. Ty jsou analyticky řešitelné jen pro kouli nebo nekonečnou plochu, ostatní tělesa se pak řeší na základě podobností. Pomocí této diferenciální metody se úloha převede pomocí diferenciálního operátoru, nejčastěji Taylorova rozvoje, na diferenciální rovnice, podle níž se různá tělesa mohou řešit za určitých okrajových podmínek pro řešení diferenciálních rovnic.

MKP v porovnání s MKD poskytuje přesnější nahrazení geometricky složitých tvarů a zadání okrajových podmínek v řešené oblasti.

Jednoduché řešení v kartézských souřadnicích (strukturovaná síť):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.4.2)$$

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} = D \left[\frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{(\Delta y)^2} + \frac{u_{k+1}^n - 2u_k^n + u_{k-1}^n}{(\Delta z)^2} \right] \quad (3.4.3)$$

U nestrukturovaných sítí se využívá napojování paraboloidu na několik okolních bodů metodou LSM (kvůli 2. derivacím). Metodu sítí lze použít prakticky pro libovolný typ parciálních diferenciálních rovnic. U specifických úloh je často nutné se omezit na speciální tvar sítě, kde časové dělení je závislé na prostorovém dělení.

3.5.2.3 Metoda konečných objemů (CVM)

Jde o zvláštní variantu FDM, v angličtině známou jako Control Volume Method (CVM), pro výpočty teplotního a látkového přenosu. Tato metoda je částečně založena na metodických a intuitivních postupech, přesto se pomocí ní řeší i velmi komplikované úlohy. Řešení jevů spojených s teplotním polem, začíná rozdělením oblasti na elementární objemy. Teplotní pole, včetně vnitřního tepla, je soustředěno do uzlů, zatímco teplotní odpory jsou soustředěny v oblastech spojených uzly sítě. Pomocí CVM se řeší například makroskopická segregace, smršťování nebo vznik dutin v odlitcích.

Hodnoty funkce jako průměry v objemových elementech (nemusí být strukturovaná síť)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla u) \quad (3.4.4)$$

$$\int_V \frac{\partial u}{\partial t} dV = \int_V \nabla \cdot (D \nabla u) dV = \int_S D \nabla u dS \quad (3.4.5)$$

3.5.2.4 Metoda okrajových prvků

Lze se také setkat s označením BEM (Boundary Element Method). Metoda se zakládá na principu základního řešení úloh, odpovídající funkci zdroje zadané ve tvaru Diracovy δ -funkce. Při využití konečných prvků k aproximaci hranice oblasti a integrální rovnice pro vnitřní části oblasti. Výjimkou této metody v porovnání s metodami FEM a FDM je nepotřeba diskretizace a určování hodnot v celé oblasti, ale naopak pouze na okrajích. K tomu tato metoda využívá převed dané úlohy na specifickou integrální rovnici. Snižuje se tím výrazně rozsah řešení, z tohoto důvodu se pro řešení tepelných dějů ve slévárenských formách příliš nehodí.

3.5.2.5 Porovnání metod MKD a MKP

MKD umožňuje snadnou diskretizaci, to se projevuje na nárocích pro hardware a na délce výpočtu. Nevýhodou této diskretizace je generování sítě geometrického modelu, vygenerovaná síť totiž deformuje zaoblení a úkoso modely, hlavně při větší rozteči jednotlivých bodů sítě. To má vliv na přesnost výpočtu, ta však lze zvýšit korekcí (zhuštění) sítě v kritických místech modelu. Z důvodu této deformace geometrie se některé matematické modely softwaru vybavují algoritmem, který automaticky během výpočtu provádí úpravy objemu a ploch elementů v závislosti na skutečné geometrii a použitých materiálech.

Výhoda metody MKP spočívá v mnohem lepším napodobování geometrické kontury povrchu modelu. Také lze mnohem snadněji docílit lokálního zahuštění sítě v komplikovaných místech modelu a to jak manuálně, tak automaticky generátorem sítě. Další výhodou MKP vůči MKD, je řešení deformací odlitku při vzájemné interakci s formou. Nevýhodou jsou delší časy nutné pro výpočet, tím jsou spojeny i zvýšené nároky na hardware počítače.

Obě metody mohou být kombinovány. Kupříkladu řešení proudění a přenosu tepla lze řešit MKD a MKP následně řešit pevnostní a deformační analýzy. Aby to bylo možné je zde nutný převod hodnot z uzlů sítě MKD do uzlů sítě MKP [55].

3.6 Matematický model programu QuikCAST

Tepelná výměna

Je popisována pomocí tří základních termálních mechanismů, které hrají důležitou roli v tepelném modelování. Jsou jimi Konvekce, kondukce a fázová přeměna. Konvekce popisuje, jak je tepelná energie transportována za pomoci proudění kapaliny. Kondukce popisuje, jak je tepelná energie transportována skrze materiál.

Tepelné výpočty, sdílení tepla

V QuikCASTu, je výpočet proudění a vedení tepla řešen stejnou rovnicí:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \cdot \overline{\text{grad} T}) - T \text{div} \vec{V}, \quad (3.6.1)$$

Rovnice řeší množství entalpie, které se přímo vypočítá z tepelného toku, vedení a proudění tepla. Konvekce (proudění) a kondukce (vedení) tepla je řešena ve stejné rovnici. Změnu entalpie program zpracovává prostřednictvím změny teploty T. Nárůst změny entalpie program zpracovává pomocí změny teploty dT.

Veličiny obsažené v rovnici jsou:

H - množství entalpie [J];

t - čas [s];

λ - součinitel tepelné vodivosti materiálu (závislost na teplotě a směru)
[W.m⁻¹.K⁻¹];

q - hustota tepelného toku [W.m⁻²];

div($\lambda \cdot \text{grad} T$) - vedení tepla;

TdivV - proudění tepla;

(Divergence vektoru - znamená objemové množství kapaliny, které vyteče z jednotkového objemu za jednotku času.)

Změna fáze v simulaci

Fázové přeměny se počítají prostřednictvím základních materiálových vlastností. U slévarenských materiálů, kterými jsou slitiny, se vypočítá entalpie pomocí níže uvedené rovnice (3.6.2).

$$h(T) = \int_0^T C_p \cdot dT + L(1 - f_s(T)), \quad (3.6.2)$$

kde je: C_p - měrná tepelná kapacita za stálého tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

L - latentní krystalizační teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$];

f_s - pevná fáze.

L , C_p , f_s jedná se o hodnoty materiálových vlastností, které jsou definovány za pomoci experimentů nebo pomocí termodynamického programu. Fyzikální vlastnosti jako jsou tepelná vodivost λ , objemová hustota ρ a materiálové vlastnosti jsou specifikovány samotným uživatelem.

Mechanika tekutin - rovnice hybnosti

Mechanika tekutin je řešena na bázi rovnic hybnosti a zachování hmoty. Tyto dvě rovnice jsou dostatečné k popisu pohybu (průtoku) nestlačitelné tekutiny.

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} = \rho \vec{g} - \rho \cdot \overline{\text{grad}}(U) - \overline{\text{grad}}(P) - \mu \cdot \overline{\text{rot}}(\overline{\text{rot}}(U)), \quad (3.6.3)$$

Rovnice hybnosti (3.6.3) je psána jako funkce gravitace, tlakových a rychlostních polí. V úvahu je také brána viskozita kapaliny. Pokud se berou v úvahu všechny podmínky, dostaneme rovnici hybnosti (3.6.4) pro program QuikCAST ve tvaru:

$$\dot{u} = \frac{[P]}{M} + (D_\mu + A_\rho)u + F_g, \quad (3.6.4)$$

kde je: u - rychlost

M - matice hmotnosti

P - matice tlaku

D_μ - matice viskozity

A_ρ - matice hybnosti

F_p - tlakové zatížení

F_g - gravitační zatížení

Kontaktní plochy

Aby bylo možné modelovat tepelný šok, mezi slitinou a formou, je nezbytné definovat HTC na rozhraní mezi objemem formy a objemem slitiny. Teplotní profil a tepelný tok na každé straně tohoto rozhraní je popsán následující rovnicí (3.6.5) a (3.6.6).

$$T(x,t) - T_1 = (T_0 - T_1) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \quad (3.6.5) \text{ a } (3.6.6)$$
$$\varphi(x,t) = -\frac{\lambda}{\sqrt{\pi at}} (T_0 - T_1),$$

kde je: T_1 - teplota stěny

T_0 - teplota okolí

a - součinitel teplotní vodivosti.

Tepelný tok na rozhraní se vypočítá podle rovnice:

$$\varphi = H_{eq}(T_{alliage} - T_{moule}) \quad (3.6.7)$$

QuikCAST automaticky počítá tento koeficient na základě velikosti meshe použitého u stěn a na základě materiálových vlastností definovaných pro objemy, které jsou v kontaktu.

4 Teoretický základ grafitických litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších doprovodných prvků, v nichž je obsah uhlíku (2,11%) vyšší než je maximální rozpustnost uhlíku v austenitu. Uhlík, který tuhne stabilně dle diagramu Fe-C, je v litinách vyloučen ve formě grafitu (grafitické litiny), nebo krystalizace probíhá rychleji, kdy vzniká cementit. Základní mechanické vlastnosti litin se řídí velikostí, tvarem a množstvím vyloučeného grafitu a druhem kovové hmoty (matrice).

Litiny lze řadit podle mechanických vlastností od méně kvalitních po lepší: litina s lupínkovým grafitem, litina s červíkovitým grafitem, litina s kuličkovým grafitem. Zlepšující se mechanické vlastnosti s sebou nesou zhoršení slévateľnosti, obrobiteľnosti, tepelné vodivosti či korozní odolnosti. Pokud je správně zvolen typ litiny s vhodným chemickým složením a případným dalším tepelným zpracováním, pak lze získat odlitek s jedinečnými mechanickými vlastnostmi.

Litiny jsou kovové materiály, které se používají na výrobu odlitků přes staletí. Jsou hojně využívané při sériové výrobě dílů v průmyslovém odvětví, jejichž odlitky musejí splňovat požadované slévářenské a mechanické vlastnosti. V minulosti se hojně při konstrukci používali grafitické litiny a jejich využití nadále pokračuje. Jen se vývoj litin více zaměřuje na jakostní druhy litiny s vysokými užitkovými vlastnostmi. Příkladem může být litina označovaná jako ADI (Austempered Ductile Iron), která se stala novým konstrukčním materiálem určeným pro výrobu vysokopevnostních odlitků. Jedná se o litinu s kuličkovým grafitem (LKG) tepelně zpracovanou izotermickým zušlechťením.

4.1 Druhy litin

Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Oproti ocelím kde eutektikum nevzniká, litiny s eutektickým složením eutektikum obsahují. Litiny, které tuhnou podle stabilního diagramu Fe-C a u nichž vzniká grafitické eutektikum jako austenit a grafit se nazývají grafitické litiny. Mezi ně patří litina s lupínkovým grafitem (LLG), litina s kuličkovým grafitem (LKG) a litina s červíkovým grafitem jinak známá jako vermikulární litina (LVG).

Pokud dochází k tuhnutí podle metastabilního diagramu Fe_3C je eutektikem ledeburit a ten je tvořen austenitem a cementitem. V těchto případech není ve struktuře přítomen

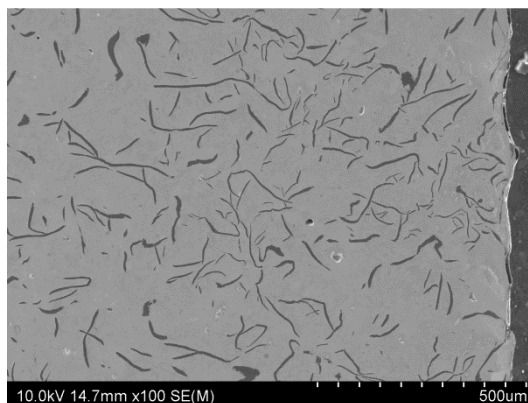
žádný volný grafit, proto se pak takové litiny nazývají bílé či karbidické. Karbidické litiny mají poměrně vysokou tvrdost, křehkost a jsou prakticky neobrobitelné. Podle metastabilního systému rovněž může vznikat tzv. zákalka (jedná se o nežádoucí prvek ve struktuře). Tímto termínem jsou označovány bílé struktury - ledeburitu (karbidů), vyskytující se u odlitků z grafitických litin, jež se nacházejí v místech s rychlým odvodem tepla, jako jsou například tenké stěny rohy, atd. Přejícným typem mezi grafitickými a bílými litinami jsou tzv. makové litiny, které v sobě obsahují jak grafitické, tak metastabilní eutektikum. Tyto struktury jsou v odlitcích nežádoucí.

Při tepelném zpracování bílé litiny lze dosáhnout tzv. temperované litiny. Odlitky z těchto litin tuhnu jako bílé litiny a grafit se utváří teprve až rozpadem cementitu při žhání. Tomuto tepelnému procesu zpracování bílé litiny se říká temperování a po jeho použití lze takto zpracované litiny zařadit mezi grafitické.

4.2 Grafitické litiny

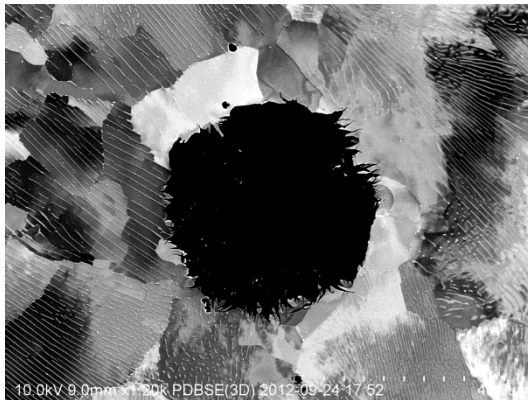
Pro správné určení druhu litiny je možné využít základních kritérií, které pomůžou při určení. Do těchto kritérií se zahrnuje např. tvar vyloučeného grafitu. Názvy druhů litin a jejich značení se řídí normami a právě podle tvaru grafitu se dají litiny rozdělit na tyto typy:

Litina s lupínkovým grafitem (LLG), též také označovaná jako šedá litina. Tato litina obsahuje grafit ve formě lupínků, a které je možné na metalografickém výbrusu vidět jako prostorových útvarů připomínající housenku. Délka lupínků je podstatně větší, než jejich tloušťka a konec lupínků je ostrý. Litina s lupínkovým grafitem (obr. 2.4) je nejtypičtější vyráběná litina.



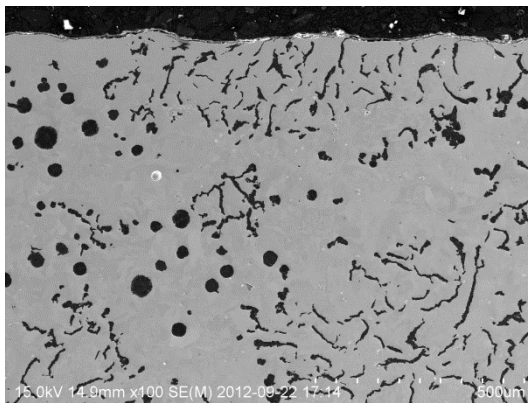
Obr. 2.4 Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem

Litina s kuličkovým grafitem (LKG), též známá jako tvárná litina. Obsahuje grafit ve formě kuliček. Dokonalá kulička je ideálním tvarem z hlediska vlastností litiny. To je však často nereálné a spíše se můžeme setkat s grafitem, jehož tvar je zvrásněný, jako je tomu např. na obrázku 2.5.



Obr. 2.5 Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem

Vermikulární Litina (LVG), též známá jako litina s červíkovitým grafitem. Červíkový grafit si je tvarem podobný grafitu tvaru lupínku. V porovnání s LLG jsou grafity LVG kratší, tlustší a konec bývají zaoblené. Vermikulární litina se často objevuje v kombinaci spolu s určitým množstvím lupínkového nebo kuličkového grafitu, jako je tomu například na obrázku 2.6.



Obr. 2.6 Mikrostruktura litiny s červíkovým grafitem

Temperovaná litina (TL), jinak také známá jako litina s vločkovým grafitem. Obsahuje grafit ve tvaru vloček. Tyto vločky vznikají rozpadem ledeburitického cementitu. Lupínkový grafit vzniká bez nutnosti jakýchkoliv metalurgických zásahů. K získání litiny s grafitem ve tvaru kuliček a červíků je nutné provést modifikaci.

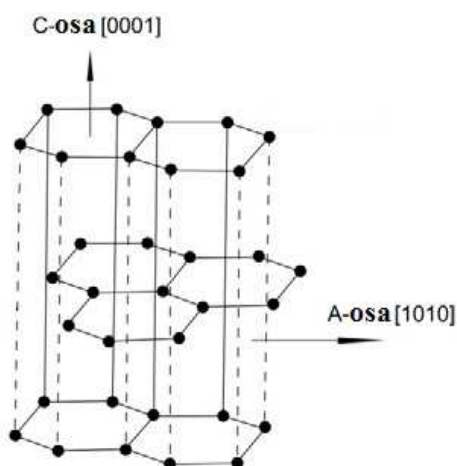
Tvar a rozložení grafitu zásadně ovlivňují mechanické vlastnosti litin. Grafit sám má velmi malou pevnost, tím pádem snižuje pevnost litiny, protože grafit zmenšuje nosný průřez základní kovové hmoty. U grafitů se na koncích útvarů koncentruje napětí a to má za následek vrubové účinky. Proto čím ostřejší jsou hrany zakončení grafitů, tím větší je vrubový účinek. Proto je z hlediska tvaru nejméně výhodný lupínkový grafit, naopak nejprůzračnější je grafit kuličkový. To má za následek podstatně vyšší mechanické vlastnosti LKG v porovnání s LLG. Vermikulární a temperované litiny leží někde mezi LLG a LKG, svými vlastnostmi.

4.3 Strukturní složky litin

Struktura litin je tvořena grafitem a základní kovovou hmotou. A u bílé litiny to je pouze základní kovová hmota.

4.3.1 Grafit

Grafit sám je krystalická forma uhlíku. Jeho struktura je tvořena vrstvami uhlíkových atomů. Každý z těchto uhlíkových atomů je propojen s dalšími třemi atomy uhlíku kovalentními vazbami, tím se utváří síť šestiúhelníků. Roviny jsou mezi sebou poutány slabými van der Waalsovými silami, to má za následek výbornou štěpnost a kluznost grafitu ve směru podél rovin. Čtvrtý elektron má schopnost pohybovat se po uhlíkových vrstvách. Jednotlivé vrstvy jsou vzájemně posunuty o polovinu šestičlenného kruhu.



Obr. 2.7 Krystalografická struktura grafitu

4.3.1.1 Druhy grafitů

Eutektický (lupínkový, kuličkový, červíkovitý) - vzniká při tuhnutí eutektika. S austenitem tvoří tzv. grafitické eutektikum.

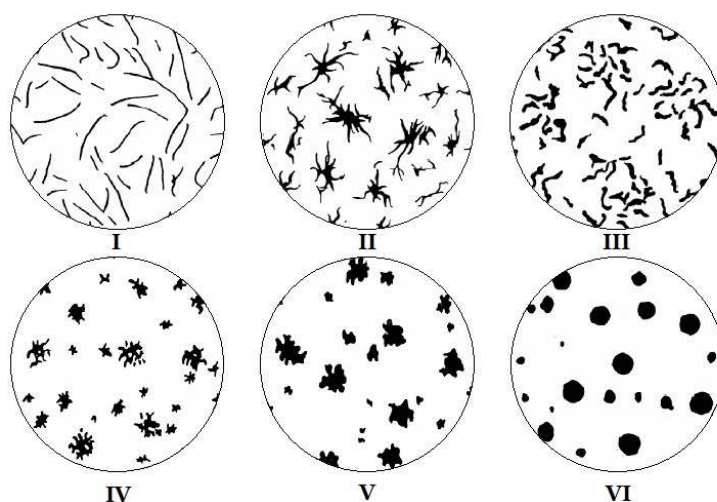
Primární - vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických grafitických litin. Má tvar hrubých lupínků a při dostatečně pomalém tuhnutí odlitku nebo při odstátí litiny v pánvi vyplouvá na hladinu kovu a tvoří grafitický šum. U silnostěnných odlitků může zůstat uzavřen především v horních partiích stěn. Primární grafit ve struktuře litiny má nepříznivý vliv na její mechanické vlastnosti.

Grafit, vznikající rozpadem metastabilních složek při tepelném zpracování (temperování, žíhání na odstranění karbidů).

Grafit, který vzniká v důsledku snižování rozpustnosti uhlíku v austenitu a při eutektoidní transformaci podle stabilního systému se obvykle připojuje k již existujícím útvarům grafitu a netvoří zvláštní fázi.

4.3.1.2 Tvar grafitu

Tvar grafitu se hodnotí podle normy ČSN EN ISO 945, která zařazuje grafit do 6-ti tříd viz obr. 2.8. Z nichž třída II a V jsou tvary nežádoucí.

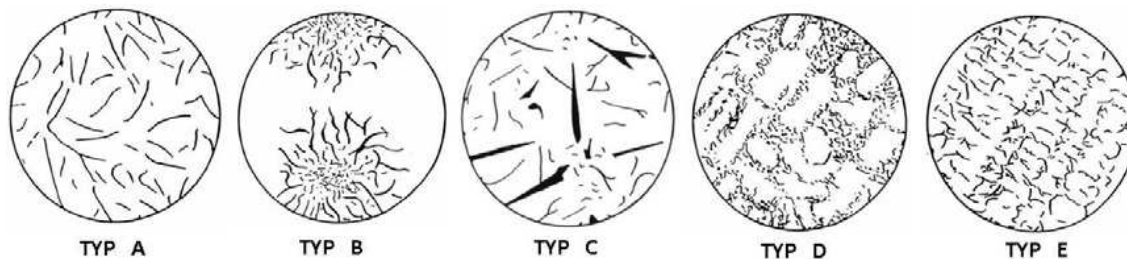


Obr. 2.8 Tvar grafitů dle normy ČSN EN ISO 945

I - lupínkový grafit, II - pavoučkový grafit, III - červíkovitý grafit, IV - vločkový grafit, V - nedokonale zrnitý grafit, VI - pravidelně zrnitý.

4.3.1.3 Rozložení grafitu

Grafit může být ve struktuře rozložen ve formě pravidelných, stejnoměrně velkých útvarů, nebo nerovnoměrně, kdy tvoří útvary nestejně velké nebo místně nahromaděné. Rozložení grafitu se rozlišuje podle normy ČSN EN ISO 945 a řadí se do 5-ti typů viz obr. 2.9.



Obr. 2.9 Rozložení grafitu dle normy ČSN EN ISO 945

Rozložení grafitu typu: A - rovnoměrné rozložení, B - růžicovitě, C - smíšené, D - mezidendritické neusměrněné, E - mezidendritické usměrněné.

Z hlediska vlastností litin je optimálním rozložením grafitů ve struktuře typ A, který zároveň obsahuje grafit se stejnoměrnou velikostí. Nepravidelné rozložení a hrubé tvary grafitu mají za následek horší mechanické vlastnosti. U typů rozložení grafitů D a E se můžeme setkat také s označením "přechlazený grafit". Ten vzniká při nedostatku krystalizačních zárodků a při rychlém ochlazení, je to jakýsi přechod od stabilního k metastabilnímu tuhnutí.

4.3.1.4 Velikost grafitu

Pro všechny typy litin jsou z hlediska mechanických vlastností výhodnější jemnozrnné grafity, které jsou vyloučeny ve formě lupínků nebo kuliček. Hrubé tvary grafitu výrazně snižují mechanické vlastnosti litiny. Za pomoci metalografie lze vyhodnotit velikost grafitu (např. jeho délka). Kombinací metalografických výbrusů a definovaných etalonů lze vyhodnocovat velikost rozložení kuličkového grafitu. To lze posoudit podle počtu kuliček na mm^2 plochy výbrusu.

4.3.2 Základní kovová hmota

Základní kovová hmota (matrice) u nelegovaných litin je za normálních teplot tvořena feritem, perlitem případně ledeburitem. Přísadovými (legujícími) prvky či tepelným

zpracováním lze dosáhnout matrice tvořené austenitem, martenzitem, bainitem nebo komplexním karbidem. Struktura základní kovové hmoty závisí na:

- 1) chemickém složení litiny - C, dále Si, Mn, P, S a obsah dalších prvků;
- 2) rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí - tloušťka stěny odlitku, typ formy a jader;
- 3) zárodečném stavu taveniny - vliv očkování, modifikace, teploty a doby přehřátí taveniny;
- 4) tepelném zpracování - bainitické kalení, temperování, atd.

Ferit

Ve struktuře litin snižuje pevnost v tahu, tvrdost a odolnost proti opotřebení, ale zvyšuje tvárné vlastnosti a vrubovou houževnatost. Ferit je u litin v podstatě definován jako tuhý roztok uhlíku a křemíku v železe α .

Perlit

Je v litinách v lamelárním tvaru, čím je větší množství perlitu v matrici, tím se zvyšují mechanické vlastnosti litiny (mez pevnosti v tahu a tvrdost - HB), avšak klesá tvárnost litiny. S rostoucím obsahem perlitu roste i odolnost litiny proti opotřebení.

Austenit

V nelegovaných litinách je austenit stabilní jen při nadeutektoidních teplotách. V odlitcích se vyskytuje pouze v legovaných litinách a jako zbytkový austenit, po tepelném zpracování. Austenitické litiny se používají pro výrobu žáruvzdorných a korozivzdorných odlitků.

Cementit

Vzniká v litině rozpadem ledeburitu. Je nežádoucí strukturní součástí litin, neboť se vyznačuje tvrdostí a křehkostí, nižší obrobiteľností a téměř žádnou tvárností.

Ledeburit

Eutektikum v metastabilní soustavě Fe-Fe₃C, obsahuje 4,3 % C. Je tvořen austenitem a ledeburitickým cementitem. Ledeburit je jednou ze základních složek bílých litin. V grafitických litinách vzniká obvykle v místech s rychlým odvodem tepla jako tzv. zákalka.

Martenzit

Vzniká bezdifuzním rozpadem austenitu při kalení nelegovaných nebo legovaných litin, v legovaných litinách někdy přímo v litém stavu. Martenzitické litiny se používají jen výjimečně.

Bainit

Vzniká jako lící struktura v litinách legovaných zejména molybdenem a niklem, u nelegovaných litin při tepelném zpracování. Litiny s bainitickou strukturou mají vysokou pevnost a tvrdost při poměrně dobrých plastických vlastnostech. Bainitické litiny (jinak známé izotermické kalené litiny) patří k moderním materiálům.

Základní kovová hmota nelegovaných grafitických litin je obvykle tvořena feritem a perlitem. Podle podílu obou složek se struktura označuje jako feritická, feriticko-perlitická nebo perlitická.

4.4 Krystalizace litin

Tuhnutí litin nebo také krystalizace litin se dělí na dvě etapy, kdy v první etapě dochází k primární krystalizaci a v druhé etapě k eutektické krystalizaci. Primární krystalizaci lze popsat jako krystalizace vznikající na krystalizačních zárodcích dendritu austenitu, které rostou až do počátku druhé etapy krystalizace. Druhou etapou je myšlen začátek krystalizace grafitického eutektika, kdy se vytváří a rostou eutektické buňky, které jsou také ovlivňovány rychlostí chladnutí taveniny. Každá z těchto krystalizačních etap začíná nukleací příslušné fáze a jejím následným růstem. Primární fází je austenit, který vzniká při tuhnutí podeutektických litin. Jeho vznik je řízen heterogenní nukleací na cizích částicích, vměstcích a na stěnách formy.

Austenit tvoří dendrity, které rostou směrem od stěny k tepelné ose odlitku, tento růst se dá označit jako vrstvené tuhnutí. Mezi dendrity dochází k druhé etapě krystalizace (vzniká grafitické eutektikum). V místech s pomalým ochlazováním dochází k objemovému tuhnutí, při kterém tavenina postupně ztrácí tekutost. Tvárná litina má větší sklon k objemovému tuhnutí, z tohoto důvodu dochází ke vzniku většího množství ředin.

4.5 Mechanické vlastnosti LLG

4.5.1 Statické mechanické vlastnosti

Malé odchylky v chemickém složení stejné varianty LLG vedou k různým mechanickým vlastnostem. Rozdíly se nalézají i v tom jakou formu zatížení má a to zda se jedná o zatížení v tahu, v tlaku, nebo ve smyku. Nejčastější používanou zkouškou pro stanovení mechanických vlastností je zkouška pevnosti v tahu a zkouška tvrdosti.

4.5.1.1 Zkouška tahem

Během zkoušky tahem dochází k záznamu tzv. napětových a deformačních charakteristik. Jedná se o závislost absolutního prodloužení ΔL (mm) měřené délky L_0 (mm) zkušebního tělesa na zátěžné síle F (N). Zkušební zařízení kreslí v průběhu zkoušky tahovou křivku, ze které lze odvodit jaké má materiál plastické a elastické vlastnosti (trvalá deformace). Typickou křivku ze zkoušky tahem je možné vidět na obr. 3.0 a lze z ní zjistit čtyři základní normované mechanické vlastnosti: Mez kluzu v tahu σ_e [MPa] nebo $\sigma_{p0,2}$ [MPa], Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa], Tažnost A [%], Kontrakce Z [%].

Mez kluzu v tahu σ_e (Re) nebo $\sigma_{p0,2}$ ($R_{p0,2}$)

Vyjadřuje maximální napětí, které je možné aplikovat, aniž by docházelo k jakékoliv trvalé (plastické) deformaci materiálu. Jinak řečeno charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí zatěžovací křivky. V tahovém diagramu se může takovéto napětí projevovat ve formě výrazné meze kluzu R_e nebo nevýrazné meze kluzu $R_{p0,2}$ (která se označuje jako smluvní mez kluzu).

Mez pevnosti v tahu σ_m (Rm)

Vyjadřuje maximální napětí, které odpovídá největšímu zatížení $F_{\max} = F_m$ materiálu dosaženého před tím než dojde k porušení zkušební tyče.

Tažnost A

Vyjadřuje poměrnou podélnou trvalou deformaci vyjádřenou v %.

Kontrakce Z

Vyjadřuje největší trvalé zúžení průměru, změřené po přetržení v místě lomu, vyjádřené v %.

4.5.1.2 Výpočet mechanických vlastností:

Mez pevnosti v tahu: $\sigma_m = \frac{F_m}{S_o}$ [MPa], (4.0.1)

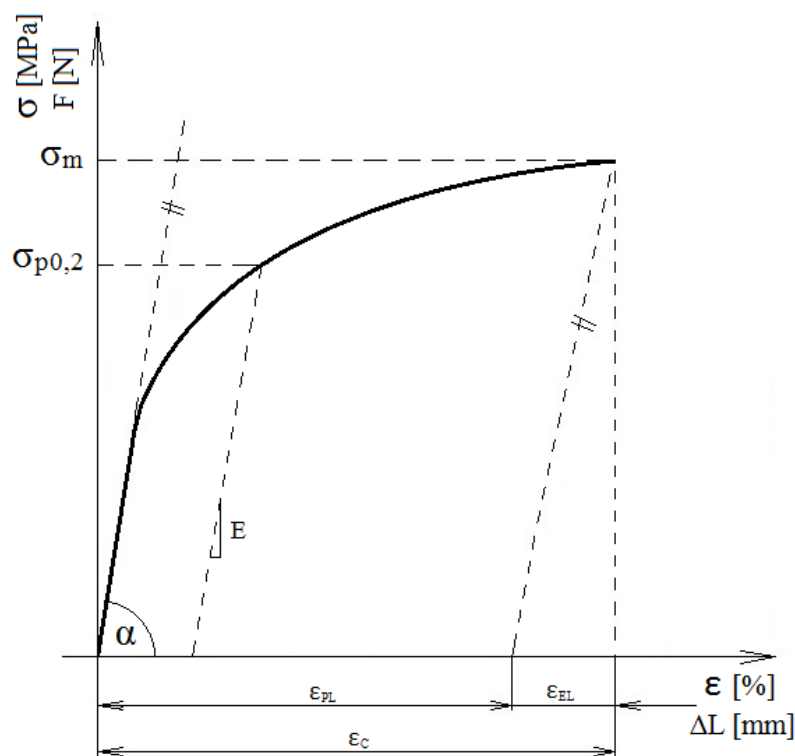
Mez kluzu v tahu: $\sigma_e = \frac{F_e}{S_o}$ [MPa], (4.0.2)

Tažnost: $A = \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot 100 = \frac{L - L_o}{L_o} \cdot 100$ [%], (4.0.3)

Kontrakce: $Z = \psi = \frac{\Delta S}{S_o} \cdot 100 = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100$ [%], (4.0.4)

L_o - původní délka vzorku, L - konečná délka vzorku,

S_o - původní průřez vzorku, S - konečný průřez vzorku.



Obr. 3.0 Zkouška tahem u litin

Napětíové charakteristiky: σ_m (R_m), $\sigma_{p0,2}$ ($R_{p0,2}$)

Deformační charakteristiky: A , Z

Modul pružnosti v tahu $E = \tan \alpha$ [MPa] (popisuje tuhost celého materiálu)

4.5.1.3 Výpočet mechanických vlastností nutných pro určení velikosti zatěžujících sil nutných při simulaci

Skutečné napětí:
$$\sigma_{TRU} = \sigma_{NOM} (1 + \varepsilon_{NOM}) = \frac{L}{L_0} \cdot \sigma_{NOM} \quad (4.0.5)$$

Nominální napětí:
$$\sigma_{NOM} = \frac{F}{S_0} \quad (4.0.6)$$

Skutečná deformace:
$$\varepsilon_{TRU} = \varepsilon_{PL} + \varepsilon_{EL} = \ln(1 + \varepsilon_{NOM}) \quad (4.0.7)$$

Nominální deformace:
$$\varepsilon_{NOM} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4.0.8)$$

Plastická deformace:
$$\varepsilon_{PL} = \varepsilon_{TRU} - \varepsilon_{EL} = \varepsilon_{TRU} - \frac{\sigma_{TRU}}{E} \quad (4.0.9)$$

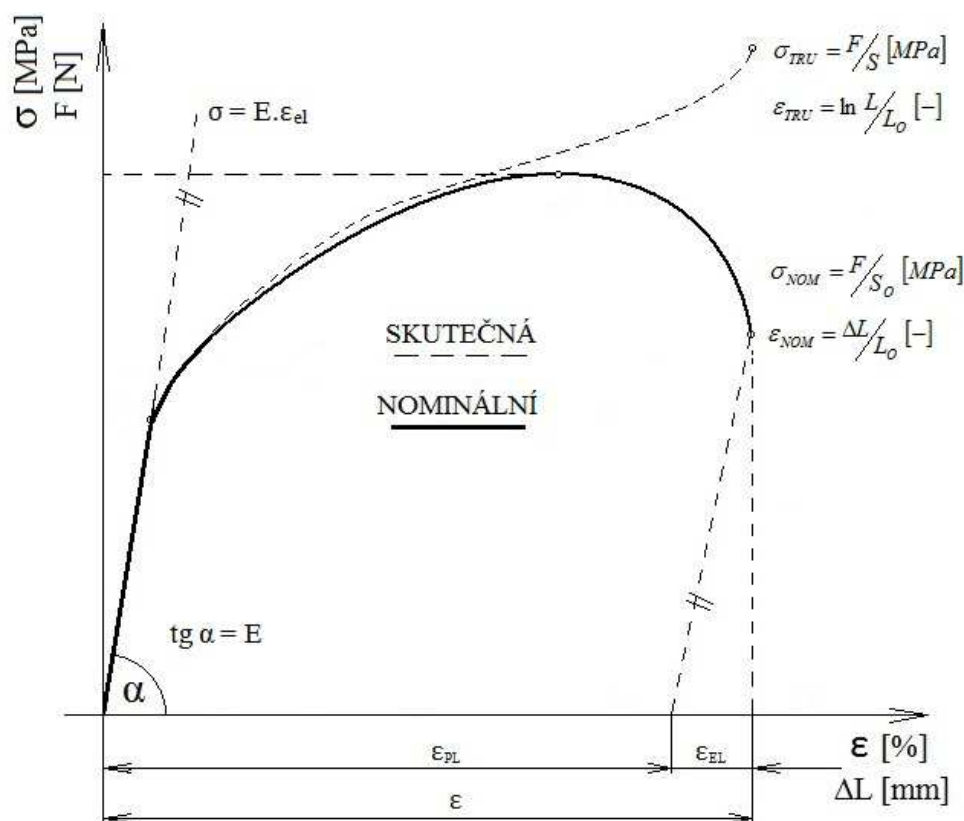
Elastická deformace:
$$\varepsilon_{EL} = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{NOM}}{E}\right)$$

(4.1.0)

Nominální diagram je diagram závislosti nominálního napětí $\sigma_{NOM} = F/S_0$ [MPa] na prodloužení $\varepsilon_{NOM} = \Delta L/L_0$ [-]. Kde nominální neboli inženýrské napětí $\sigma_{NOM} = \sigma_{ENG}$ je vyjádřeno jako síla F působící na zkušební vzorek, normalizujeme vzhledem k původní ploše průřezu zkušební vzorku S_0 .

Skutečný diagram je diagram závislosti skutečného napětí $\sigma_{TRU} = F/S$ [MPa] na logaritmickém prodloužení $\varepsilon_{TRU} = \ln L/L_0$ [-]. Kde je skutečné napětí σ_{TRU} vyjádřeno jako podíl síly F a okamžité plochy průřezu S a kde síla F a průřez S se mění.

Podobné je to s definováním inženýrského přetvoření $\varepsilon_{ENG} = \varepsilon_{NOM}$, můžeme definovat skutečné (true) přetvoření. Délka se mění kontinuálně a její malá změna dl vede k přírůstku přetvoření $d\varepsilon = dl/l$, kde l je okamžitá délka vzorku. Celkové přetvoření je pak součtem těchto přírůstků ε_{TRUE} .



Obr. 3.1 Nominální a Skutečný diagram

Skutečné přetvoření je nazýváno logaritmickým přetvořením, nebo také Henckeho přetvořením. Při malých deformacích je rozdíl mezi oběma přetvořeními zanedbatelný. Skutečné a inženýrské přetvoření je pak vázáno vztahem (4.0.7). Pokud předpokládáme konstantní objem při plastické deformaci a zanedbáme objemové změny, máme vztah mezi skutečným a nominálním napětím (4.0.5).

4.5.1.4 Vliv deformace na chování mikrostruktury

Litina s lupínkovým grafitem (LLG) nemá výraznou mez kluzu. Jakmile začne působit zatížení, dojde u některých částí materiálu k začátku plastických deformací. Vzhledem k tomu, že je materiál částečně elastický a částečně plastický během tahového zatížení, potom výsledná křivka z tahové zkoušky může být popisována jako celková křivka, která je na obr. 3.0.

LLG je křehký materiál, který se do značné míry deformuje plasticky. Tvar grafitových lupínků ovlivňuje mechanické vlastnosti nejvíce. Při zatížení LLG dochází na hrotech grafitových lupínků k velkým koncentracím napětí. To znamená, že je pevnost závislá na charakteru mikrostruktury, a to hlavně díky množství, velikosti, morfologii a

rozložení grafitu ve struktuře litiny. Například vyšší obsah grafitu a větší délka grafitových lupínek snižuje modul pružnosti a pevnosti. Tak aby bylo možné řídit charakter mikrostruktury a pevnost litiny, je potřeba provést změnu chemického složení a řídit rychlost ochlazování při tuhnutí a chladnutí. Právě legující prvky (chem. složení) výrazně ovlivňují velikost modulu pružnosti a pevnosti.

Dalším prvkem ovlivňující mechanické vlastnosti v mikrostrukturách je velikost eutektických buněk. Eutektická buňka je krystalizační jednotka vznikající při eutektické přeměně. Zvláštností u eutektik je nevýrazné rozhraní mezi eutektickými buňkami. Velké množství buněk v objemu znamená, vysokou pevnost v tahu. Proto se využívají očkovačla, která ovlivňují velikost zrn při krystalizaci.

I perlitická matrice ovlivňuje mechanické vlastnosti (pevnost). Ta je tvořena dvěma fázemi, fází feritu a fází cementitu. Vlastnost perlitu závisí na rozteči lamel mezi feritem a cementitem (čím menší rozteč tím vyšší je mechanická pevnost) [47]. Tvorba perlitu je žádoucí v mnoha ohledech, proto je jeho vznik podporován přidavkem některých legujících prvků. Vznik perlitu lze podpořit prvky jako je např. Cu a Cr.

4.5.2 Dynamické mechanické vlastnosti

Hlavním využitím LLG je konstrukce součástí motoru. Vzhledem k tomu, že jsou všechny motory vystaveny cyklickému namáhání, vždy zde existuje riziko vzniku únavy (vznik a šíření prasklin) viz obr. 3.2 [52], [53]. Z tohoto důvodu je důležité mít na paměti dynamické mechanické vlastnosti materiálu.



Obr. 3.2 Prasklina mezi sedly ventilů v důsledku termomechanické únavy

Dynamické vlastnosti jsou určovány na základě cyklického zatěžování. Kombinací testů jako je tah - tlak, ohyb a krut, lze dojít k závěru, že tvrdost matrice a klesající velikost grafitu jsou parametry, které zlepšují únavové vlastnosti [48].

K šíření trhlin dochází, když je LLG vystavena cyklickému tahovému napětí. Vzhledem k tomu, že grafit má velmi nízkou pevnost, vytváří to přirozenou cestu pro růst trhlin. Hlavním přínosem k pevnosti je oblast mezi eutektickými buňkami, kde je velké množství absorbované energie. Praskliny se pak mohou šířit přes eutektické buňky. U eutektických buněk existují malé oblasti matrice mezi grafity (můstky matrice). Protože jsou ale tyto oblasti uvnitř eutektických buněk velmi malé, jejich podíl je na celkovou tuhost také malý [49].

Jedním z důvodů, proč je mez únavy LLG ovlivněna eutektickými buňkami, je protože grafit v eutektických buňkách nepřekračuje hranice mezi buňkami. Proto jedním z hlavních přispěvatelů k absorbování energie během lomu je ohraničující oblast [49].

4.5.2.1 Termomechanická únava

Litina s lupínkovým grafitem (LLG) je známá svou dobrou odolností proti termomechanické únavě. Právě proto je tato litina používána při konstrukci dílů motoru [42], [43], [44]. Jedná se totiž o materiály s vysokou mezí pevnosti a vysokou tepelnou vodivostí, což vede k vysoké odolnosti proti tepelné únavě. Mezi další faktory, které popisují tepelnou únavu, patří modul pružnosti a tepelná roztažnost. Tepelné namáhání, složené ze všech těchto ovlivňujících faktorů, může vést k výrazu ve tvaru:

$$\pm \sigma = \alpha_l \cdot E \cdot \Delta T \quad (4.1.1)$$

Kde: σ - Tepelné namáhání (Tahové a tlakové napětí);

α_l - Tepelná roztažnost (Teplotní roztažnost);

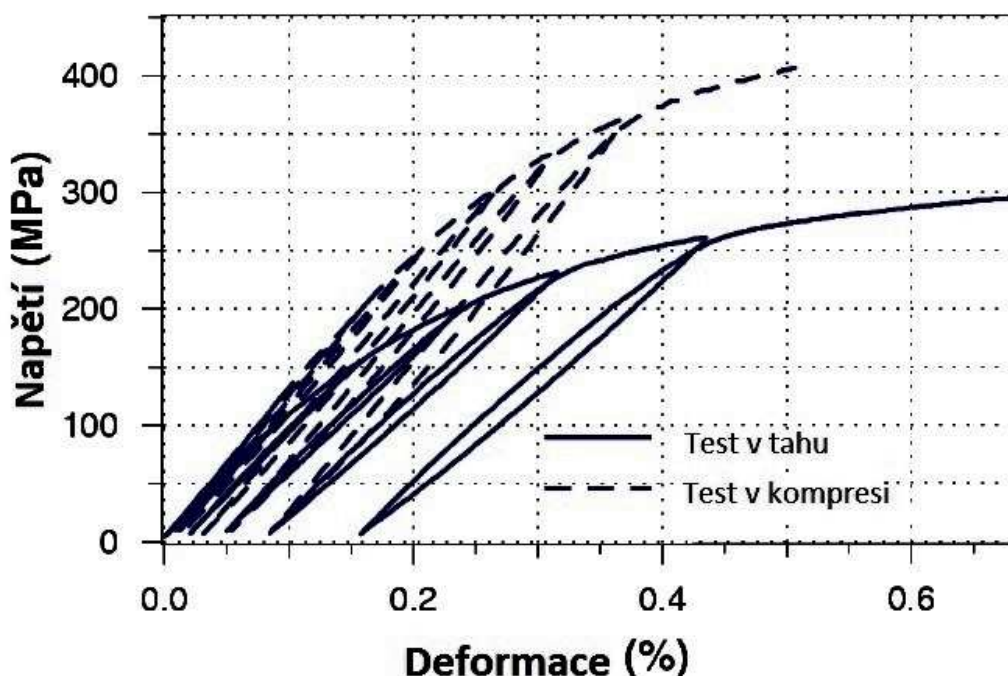
E - Modul pružnosti (Youngův modul pružnosti v tahu);

ΔT - Změna teploty (Rozdíl teplot).

Jelikož se údaje pro stejné parametry mezi různými zdroji velmi liší, je těžké definovat přesné vztahy. U LLG lze dospět k závěru, že grafit do značné míry ovlivňuje tepelné vlastnosti [50].

4.6 Úvod do problematiky chování grafitických litin

Pokud na vícefázový materiál působí vnější zatížení, rozložení napětí na mikrostrukturální úrovni je nevyhnutelně nehomogenní v důsledku různých mechanických vlastností základních fází. K těmto nehomogenním materiálům se řadí litiny, které se skládají z matrice (feritu, perlitu nebo směsi feritu a perlitu) a grafitu. Při vnějším tahovém zatížení litiny, grafit s nižší tuhostí a nekovovým charakterem vykazuje mnohem nižší napětí, než je tužší feritická nebo perlitická matrice. Grafit v matici litiny vytváří vrubové účinky, proto kolem lupínků grafitu dochází ke koncentraci napětí (koncentrační účinek napětí). Takto koncentrované napětí, pak vykazuje schopnost útlumu.



Obr. 4.4 Anizotropie v tahu a tlaku v důsledku účinku grafitu v litinách [52]

Pevnost v tlaku je u grafitických litin s lupínkovým grafitem (LLG) velmi dobrá. Hodnoty pevnosti v tlaku jsou 3krát někdy až 4krát větší než hodnoty pevnosti v tahu viz obr. 4.4. Pevnost v tlaku je podstatně méně ovlivňována tvarem, velikostí a rozložením grafitu než pevnost v tahu.

V současné době je snaha zjistit vazby mezi grafitem a maticí a predikovat jejich chování v rámci působení vnějších sil a napěťových stavů. V rámci toho je důležité, aby makroskopické mechanické vlastnosti materiálu byly založeny na mikromechanickém chování materiálu. Za pomoci simulačních výpočtů, budou výsledky zkoumaných vazeb

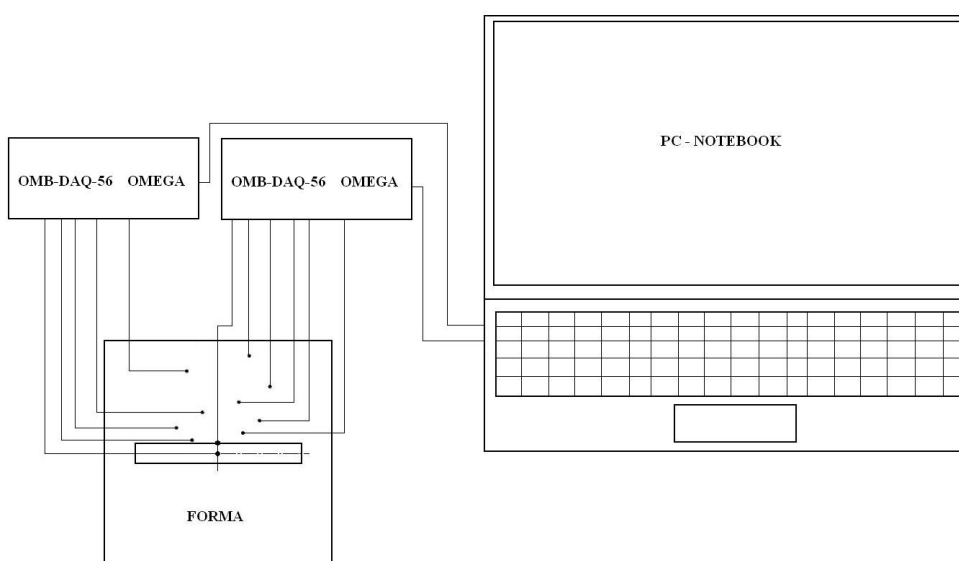
v mikrostruktuře použity na pomoc při interpretaci in-situ X-ray rentgenové difrakční studii, prováděné v práci zaměřené na zvýšení únavové pevnosti litinových dílů pomocí optimalizace zbytkových napětí.

5 Experimentálně-výpočtová část tepelných procesů

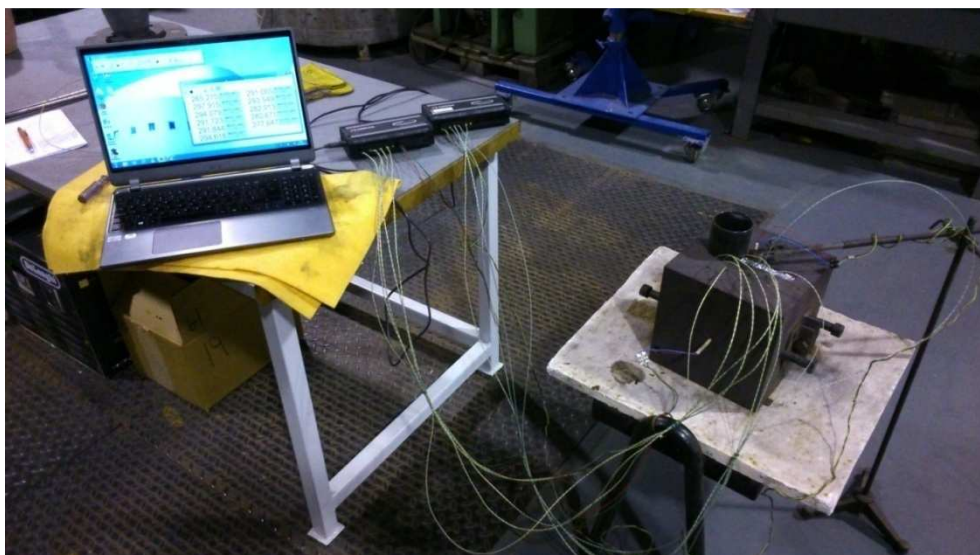
Experimenty byly prováděny za účelem zjišťování časových závislostí v tepelné ose odlitku a v různých místech slévárenské formy při různých teplotách a různých odlévaných materiálech. Tyto experimenty byly zaměřeny na zjištění hodnot součinitele prostupu tepla mezi odlitkem a formou za pomoci simulací. Odlitek byl odléván ve tvaru desky do studené a předehřáté ocelové kokily. Kokila byla umístěna na desce z minerální vlny (sibral), která tvořila nejen podklad, ale zároveň dno formy. Veškerá měření a vyhodnocení experimentů, byla provedena na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci.

5.1 Popis měřícího zařízení pro potřeby experimentů

Pro účely měření byla použita soustava zařízení, která je tvořena systémem pro záznam teplot v kokile v reálném čase viz **obr. 4.1.0**. Reálné zapojení celého systému použitého pro měření je pak vidět na **obr. 4.1.1**. Nejdůležitější součástí celého zapojení pro samotný záznam teplot (dat) do počítače, byla USB-data sběrnice (typ OMEGA s typovým označením OMB-DAQ-56). Tato sběrnice byla připojena k PC pomocí univerzální sériové linky (USB), která zajišťuje jak přenos dat, tak i napájení jednotlivých modulů. Jedna sběrnice má 10 termočlánekových vstupů se systémem jenž má 22-bitové rozlišení. Jelikož se využívalo až 12 termočláneků, bylo nutné použít dvou sběrnic (na každé z nich 6 obsazených pozic).



Obr. 4.1.0 Blokové schéma měřícího zařízení



Obr. 4.1.1 Reálné zapojení měřícího zařízení

Ke snímání teplotního pole v ocelové kokile byly použity termočlánky typu K (NiCr-Ni) o průměru vodiče 0,5 mm, které byly napojeny přímo na USB sběrnice. Termočlánky typu K mají měřicí rozsah -200 do 1200°C s tolerancí chyby $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$. Teplota v tepelné ose odlitku a na líci formy byla sledována termočlánkem typu K o průměru 0,2 mm opět z materiálu NiCr-Ni. Oba termočlánky byly opatřeny korundovou dvoukapilárou o rozměrech $\varnothing 4 \times 160$ mm, a bylo nutné je připravovat pro každou tavbu.



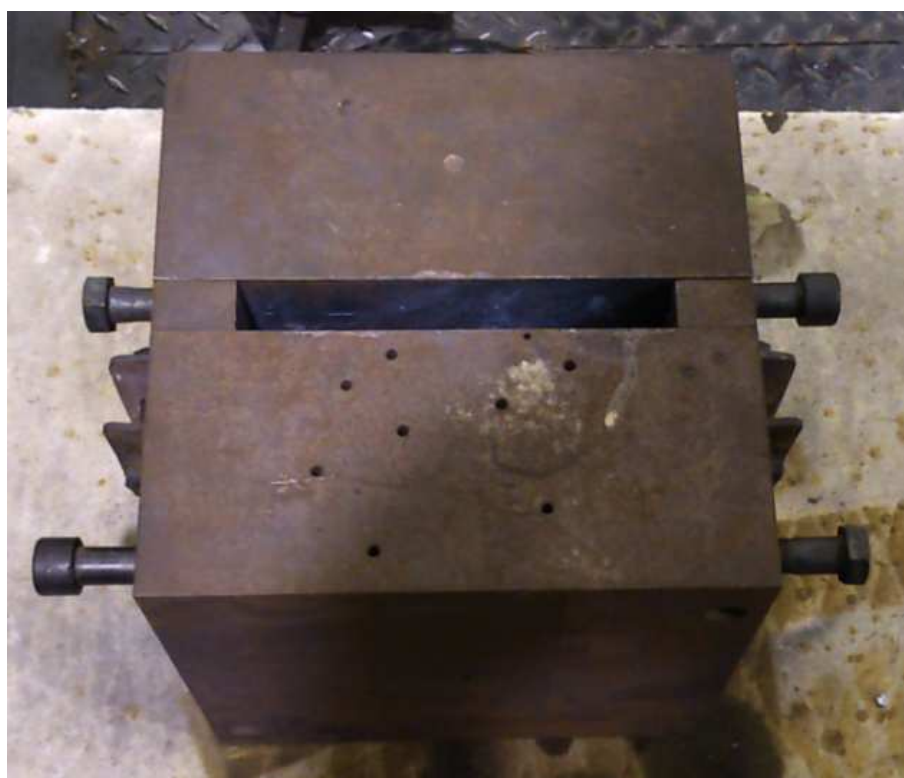
Obr. 4.1.2 USB-data sběrnice OMEGA typu OMB-DAQ-56

Pro potřeby ukládání snímaných hodnot do PC, byl notebook vybaven softwarem Personal DaqView plus 2.2.1 viz obr. 4.1.3, který je přímo určený ke komunikaci s USB sběrnicemi OMEGA (obr. 4.1.2).

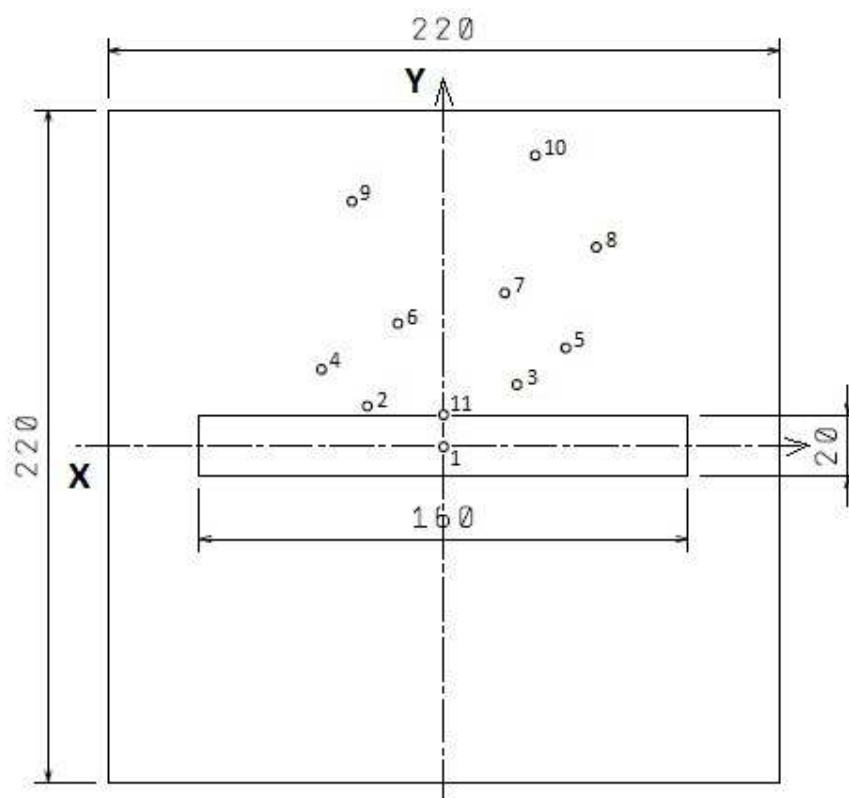


Obr. 4.1.3 Software Personal DaqView plus 2.2.1

Forma - ocelová kokila viz **obr. 4.1.4**, z legované oceli ČSN 19 552 (X38CrMoV5.1) o rozměrech 220 x 220 x 220 mm, je vhodná pro gravitační lití. Chemické složení materiálu formy je: 0,30 až 0,40 % C; 0,20 až 0,50 % Mn; 0,8 až 1,2 % Si; 4,5 až 5,5 % Cr; 1,1 až 1,7 % Mo; 0,35 % V; max. 0,035 % P; max. 0,035 % S. Rozměry formy jsou navrženy tak, aby se počítalo s možnými procesy, které by mohly ovlivňovat daný děj. Umístění termočlánků je naopak navrženo tak, aby se potlačil nežádoucí vliv odvodu tepla z měřených míst. Současně je zvolen co nejmenší průřez otvorů pro termočlánky, tak aby se měřily skutečné teploty. Hloubka těchto otvorů odpovídá polovině výšky formy. Rozmístění otvorů pro termočlánky je dle poloh, viz **obr. 4.1.5**. Poloha bodu 11 se nachází uprostřed teplosměnné plochy odlitku (Z) a přímo na lici formy (X, Y).



Obr. 4.1.4 Rozložení měřených míst v reálné kokile



Obr. 4.1.5 Rozložení měřených míst v kokile

V tabulce 3.3 jsou uvedeny souřadnice míst pro měření teplot v kokile, které se vztahují k obrázku 4.1.5.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X (mm)	0	-25	24	-40	40	-15	20	50	-30	30	0
Y (mm)	0	13	20	25	32	40	50	65	80	95	10

Tab. 3.3: Souřadnice měřených míst v kokile

Při volbě rozměrů odlitku tvaru desky je dbáno na to, aby se předešlo tepelnému ovlivňování jeho středu teplosměnnými plochami. Proto volbu tloušťky odlitku řídila podmínka, která říká, že tloušťka musí být 6 krát až 10 krát menší než je délka a výška odlitku. Na základě toho má odlitek tvaru desky, který je z vybraných slévárenských materiálů, rozměry 220 x 160 x 20 mm. Materiály vybrané pro experiment jsou jedny z nejvíce využívaných primárních veličin užívaných ve slitinách v současnosti.

5.2 Použité slévárenské materiály při experimentech

Z experimentálních důvodů byly použity neželezné kovy, jež jsou souhrnně zapsány v tabulce 3.5 a které tuhnou při jedné teplotě s výjimkou slitiny hliníku AlSi12. Materiál odlévaných kovů, byl nataven v grafitovém kelímku v laboratorní odporové peci typu 11016S CLASIC (obr. 4.1.6). Pec je vybavena přívodem pro inertní plyn (argon, dusík), popř. CO₂. Vnitřní rozměry pece jsou 450 x 600 x 400 mm a maximální teplota, kterou lze dosáhnout je 1550°C. Maximální rychlost ohřevu je 200°C/hod, a minimální je 10°C/hod. Rychlost ochlazování v peci je nastavitelná od 150°C/hod do 10°C/min.



Obr. 4.1.6 Laboratorní odporová pec CLASIC

Před každým litím byla tavenina příslušného kovu zbavena nečistot a vměstků. Slitina hliníku AlSi12 byla ošetřena rafinační solí T3 (směs solí NaF, NaC₂, KC₂, SiO₂). Při každé tavně, byla provedena kontrola teploty taveniny těsně před jejím odlitím, za pomoci digitálního teploměru Greisinger GTH 1150 C opatřeného termočlánkem NiCr-Ni typu K. Rozsah měřidla se pohybuje od -50°C do +1150°C s přesností ±1%. Snahou kontrol bylo zajistit dosažení stejných podmínek experimentů.

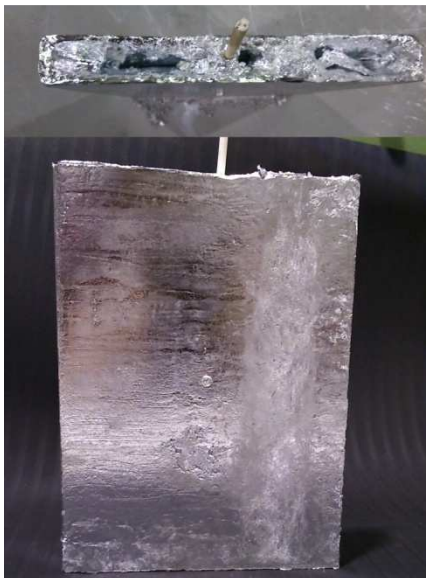
V tabulce 3.4 je uveden přehled slévárenských materiálů použitých v experimentální části této práce.

Odléváný kov	Teplota tání [°C]
Hliník (AL)	660
Zinek (Zn)	420
Slitina AlSi12	560

Tab. 3.4: Přehled použitých slévárenských materiálů

5.3 Experimenty pro sledování tepelných polí v odlitku a kokile

Experimentální část obsahuje souhrn výsledků z dílenských měření, zahrnují zaznamenaná data o teplotních polích ve slévárenské formě. Nebo-li časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku tvaru desky 210x160x20 mm (**obr. 4.1.7**), na líci formy a ve slévárenské formě v místech, jež jsou popsána na **obr. 4.1.5**. Bylo provedeno několik měření, které jsou zaznamenány v jedné souhrnné tabulce 3.5. Ta obsahuje jak teplotu nataveného materiálu (počáteční teplota lití), tak teplotu formy pro každý materiál viz tabulka 3.4.



Obr. 4.1.7 Ztuhlý odlitek tvaru desky se zatuhlou korundovou dvoukapilárou v ose odlitku a s výrazným otiskem od dvoukapiláry ve středu odlitku (líc formy)

V okamžiku vlastního odlévání byl manuálně spuštěn záznam průběhů teplot v časovém intervalu, začínající odléváním, pokračující tuhnutím a končící chladnutím odlitku. Průběhy teplot byly zaznamenávány v ose odlitku a v jednotlivých místech slévárenské formy, které je možné vidět na obrázku **4.1.8**. Celý průběh měření byl sledován v reálném čase na obrazovce PC pomocí programu viz kapitola 5.1 **obr. 4.1.3**. Tyto

časové průběhy teplot charakterizují teplotní pole ve stěně této formy. Každý z materiálů byl odléván jak do studené kokily, tak i do teplé kokily. Teplota formy pro odlévání hliníku a jeho slitin se doporučuje 150 až 200 °C. Přehled materiálů a teplot pro jednotlivá měření jsou uvedena v tab. 3.5.

Č. tavby	Odlévaný materiál	Teplota formy [°C]	Teplota taveniny [°C]
1	Hliník (Al)	20	720
2	Hliník (Al)	70	720
3	Hliník (Al)	185	720
4	Hliník (Al)	195	720
5	Zinek (Zn)	20	490
6	Zinek (Zn)	19	520
7	Zinek (Zn)	42	520
8	Zinek (Zn)	320	580
9	Slitina AlSi12	20	725
10	Slitina AlSi12	340	660

Tab. 3.5 Přehled provedených měření

S těmito materiály, bylo provedeno několik experimentů, přesto pro účely simulačních výpočtů byly vybrány jen některé. V příloze č. 1 jsou uvedeny hodnoty vybraných veličin použitých slévárenských materiálů. Časové závislosti teplot naměřené v tepelné ose odlitku a v objemu kokily jednotlivých experimentů jsou uvedeny v další kapitole, jež jsou doplněny o výsledky simulačních výpočtů. Na **obr. 4.1.8** je ocelová kokila, před odlitím desky, připravená k měření teplotního pole.



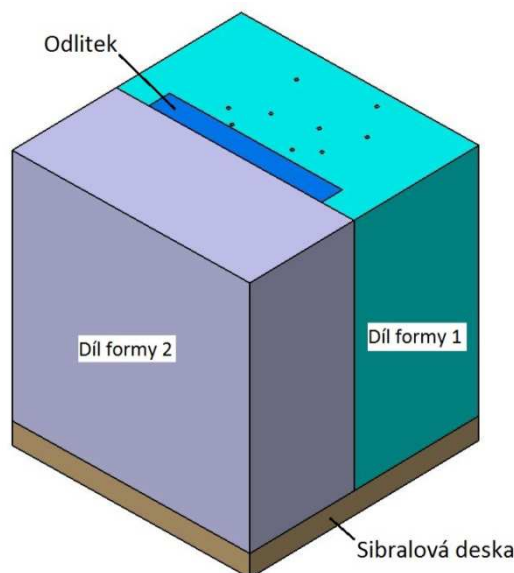
Obr. 4.1.8 Ocelová kokila, před odlitím desky, připravená k měření teplotního pole

5.4 Simulační výpočty

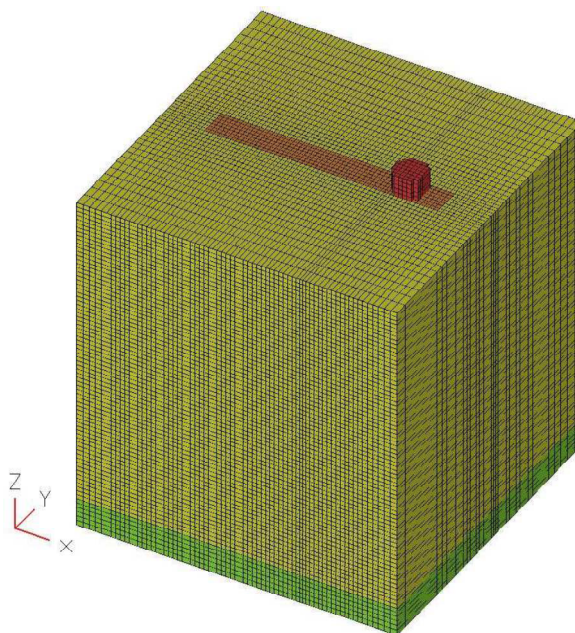
Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků pro vybrané materiály viz tab. 3.4 v ocelové kokile, byly prováděny v programu QuikCAST od francouzské firmy ESI Group, která má zastoupení i v ČR. Každý simulační program určený pro slévárenské analýzy je tvořen databází tepelně-fyzikálních veličin. Jejich obsah a kvalita se řídí cenou používaného programu. Program použitý při řešení této práce postrádal rozsáhlost obsahu databáze s materiály, proto to vedlo k doplnění tepelně-fyzikálních veličin dodatečně, včetně nových materiálů. Program je založený na základních rovnicích přenosu tepla viz kapitola 3.6. Jak je zmíněno v kapitole 3.5.1 simulační výpočty jsou vždy provedeny podle základních kroků CAE:

5.4.1 Pre processing

Geometrická data odlitku a formy jednoduchých tvarů, mohou být v programu QuikCAST vytvořena za pomoci vlastního CAD modulu nebo se mohou načítat z externího CAD programu. Pro složitější tvary odlitku a formy je praktičtější využít externích CAD programů. Modifikace tvarů odlitku a formy, včetně připojené vtokové soustavy je mnohem snadnější a rychlejší v externích programech.



Obr. 4.1.9 CAD model z externího programu CATIA připravený pro export



Obr. 4.2.0 Výpočtový model připravený pro analýzy v programu QuikCAST

Součástí pre-processingu je vytvoření sítě pro odlitek, formu a podkladovou desku viz **obr. 4.2.0**. Pro potřeby simulačních výpočtů bylo nutné nastavit veškeré hodnoty před spuštěním výpočtů. Před tvorbou sítě je nutné nadefinovat takzvaný "Inlet", jedná se o nastavení toku kovu (počáteční tečení z pánve). Pokračuje generace sítě a přiřazení materiálových vlastností objemům s vygenerovanou sítí. Po těchto krocích následuje nejdůležitější část celého nastavení a tím je definice tepelných podmínek (tepelně-fyzikálních veličin), též to obnáší definici teploty lití, teplotu formy, teplotu okolí, rychlost plnění formy a velikost časového intervalu a výpočtového kroku.

5.4.2 Processing

Tak jako pre-processing, tak i processing je prováděn v programu QuikCAST. Jedná se o hlavní část celého simulačního programu. V processingu probíhá výpočet tepelných změn simulovaných slévárenských procesů. Také lze pomocí programu řešit problematiku plnění formy, které je ovlivňováno řadou fyzikálních faktorů taveniny, ke kterým patří viskozita, povrchové napětí, staženiny atd. K řešení simulačních výpočtů je využívá matematický model, který je uveden v kapitole 3.6.

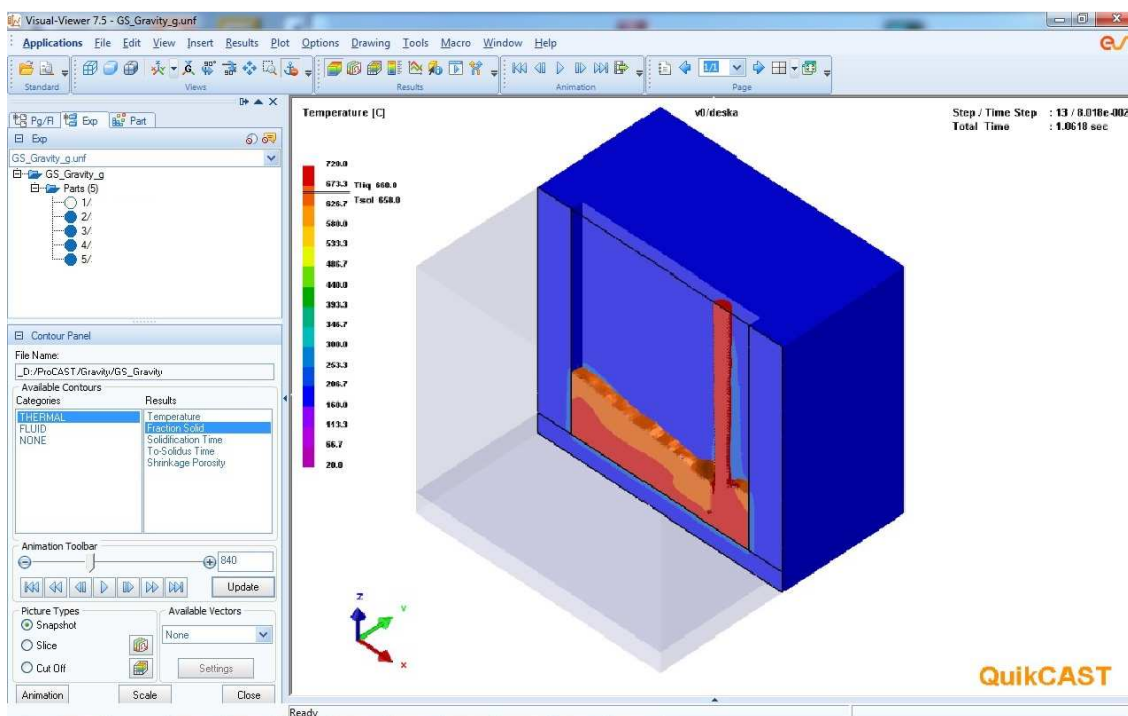
5.4.3 Post processing

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno za pomoci dalšího programu. Jedná se o program Visual-Environment, který byl dodán společně s programem QuikCAST.

Slouží k vyhodnocení a zobrazení výsledků simulačních výpočtů. Výsledky lze zobrazit jako vizuální výsledek jako proces lití a tuhnutí nebo jako grafické zobrazení výsledků. Číselné hodnoty výsledků (grafické zobrazení výsledků) lze exportovat a zpracovat v excelovském tabulátoru. Graficky a vizuálně lze zobrazit:

- teplotní křivky min. a max. teplot (šíření teploty v objemu = izotermny)
- deformace a zbytková napětí odlitku
- kriteriální funkce (teplotní gradient, rychlost tuhnutí a jejich kombinace)
- tvorba porosity.

Pro simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků v kovových formách je důležitý vliv hodnoty tepelného odporu (inversní součinitele prostupu tepla), popisující děje na rozhraní odlitku a formy. Součinitel prostupu tepla závislí na čase byl stanoven na základě charakteristik změřených v experimentální části této práce.



Obr. 4.2.1 Vyhodnocení simulačních výpočtů v programu Visual-Environment

5.4.4 Vliv tepelné vodivosti formy

K prvním simulačním výpočtům byl vybrán slévárenský materiál hliník. S jeho pomocí bylo odladěno nastavení simulačních výpočtů. Využity byly tepelně-fyzikální vlastnosti, databáze programu QuikCAST, které udali směr na základě prvních výsledků, jež byly zcela mimo reálná čísla. Také pro potřeby odladění byla využita teplota v ose odlitku, než byly provedeny simulace i pro teploty formy. Pokračovalo se systematicky, tak aby se snížil počet simulačních výpočtů. Podpora programu QuikCAST, doporučovala jít cestou úprav tepelně-fyzikálních vlastností formy a odlitku. Jasným předpokladem je ovšem neměnnost fyzikálních vlastností materiálů. Rozhodnutím bylo se zaměřit na veličinu, která má vliv na rychlost transferu tepelné energie formy a tou je tepelná vodivost λ . I přes předpoklad, že jsou fyzikální vlastnosti neměnné, byly provedeny kontrolní simulační výpočty s modifikovanými materiály (tab. 3.6), které zaslala firma ESI Group (podpora programu QuikCAST). Podle výsledků byly vybrány nejvhodnější tepelně-fyzikální, chemické a fyzikální charakteristiky popisující všechny tři odlévané materiály. S jejich pomocí byla provedena série několika simulačních výpočtů, u kterých proběhla změna tepelné vodivosti λ pro formy (viz tab. 3.7).

	Al Varinta 1	Al Varianta 2
Teplota Likvidu [°C]	660,05	670,00
Teplota Solidu [°C]	658,05	660,00
Teplota Eutektika [°C]	659,05	665,00
Latentní teplo [J/kg]	396 100	397 016,31
Smrštivost [%]	1,8	3

Tab. 3.6 Příklad modifikací hodnot na materiálu hliníku

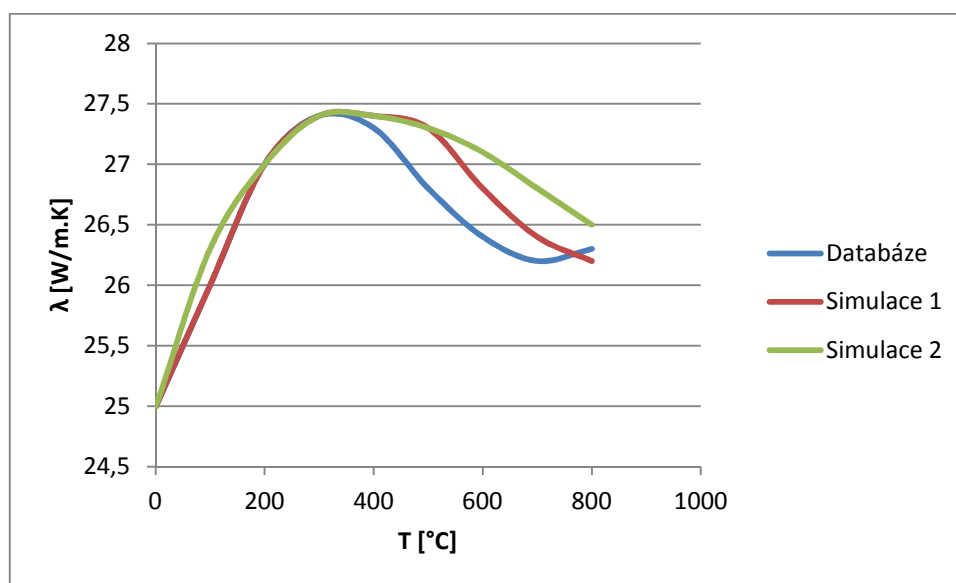
Z nich vyplynul nepatrný vliv upravených hodnot λ na teplotu v ose odlitku. Upravené hodnoty tepelné vodivosti, ale mohou napomoci při finalizaci výsledných hodnot teplotních polí (dosažení co nejreálnějších průběhů výsledných křivek), nikoliv však pro celkovou simulaci tuhnutí a chladnutí odlitku v ocelové formě. V tabulce 3.6 jsou příklady modifikací na materiálu (Al), nejedná se však o celý výčet modifikovaných veličin. Změny se týkali i veličin jako například tepelná vodivost λ , specifické tepla, atd.

V tabulce 3.7 jsou opsané a použité fyzikální veličiny závislé na teplotě pro ocelovou kokilu ČSN 19 552 (X38CrMoV5.1). Základní hodnoty jsou z databáze simulačního

programu. Simulace 1 a simulace 2 jsou upravené hodnoty tepelné vodivosti formy, které jsou graficky zobrazeny na **obr. 4.2.2**.

Teplota $T [^{\circ}\text{C}]$	Hustota $\rho [\text{kg.m}^{-3}]$	Měrná tepelná kapacita $c [\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Databáze Tepelná vodivost $\lambda [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Simulace 1 Tepelná vodivost $\lambda [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Simulace 2 Tepelná vodivost $\lambda [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
1	7740	461	25,0	25,0	25
100	7720	496	26,0	26,0	26,3
200	7700	533	27,0	27,0	27,0
300	7670	568	27,4	27,4	27,4
400	7630	611	27,3	27,4	27,4
500	7600	677	26,8	27,3	27,3
600	7570	778	26,4	26,8	27,1
700	7540	1400	26,2	26,4	26,8
800	7520	740	26,3	26,2	26,5

Tab. 3.7 Fyzikální vlastnosti legované ocelové formy ČSN 19 552



Obr. 4.2.2 Hodnoty tepelné vodivosti λ pro formu

Jelikož se ukázali první předpoklady jako nedostatečné, řešení práce se zaměřilo na tepelně fyzikální vlastnosti a jejich modifikaci. Použitím správných tepelně-fyzikálních vlastností lze nadefinovat tzv. okrajové podmínky. První definice okrajových podmínek se zaměřila na rozhraní odlitek forma.

5.4.5 Vliv součinitele prostupu tepla

První obdržená verze programu QuikCAST nepodporovala nadefinovat prostup tepla, jenž by byl závislý na teplotě. V tomto případě se jednalo o převrácenou hodnotu součinitele prostupu tepla, protože k definici tepelných procesů na rozhraní formy a odlitku, QuikCAST využívá tepelného odporu. Jelikož tento program nabízel možnost nastavení rozhraní pouze jednou jedinou hodnotu, která nebyla funkcí teploty nebo času, byly první simulace definovány pouze jednou hodnotou tepelného odporu. Ale i přesto se z těchto výpočtů dala získat představa, jaký vliv má součinitel prostupu tepla. S další verzí programu QuikCAST (nová verze) již bylo možné definovat více hodnot tepelného odporu, který ovšem mohl být definován pouze v závislosti na čase, nikoliv teplotě. Z tohoto důvodu jsou hodnoty součinitele prostupu tepla uváděny v souhrnné tabulce spolu s hodnotami času, teplot a tepelného přechodového odporu. Tyto hodnoty jsou kombinací předpokladů a hodnot z experimentálního měření. Díky možnosti definice přechodového odporu v závislosti na čase, bylo možné provést simulační výpočty nutné pro odladění procesu lití a tuhnutí v programu QuikCAST. K několika výpočtům byly použity hodnoty času, souč. prostupu tepla resp. tepelný přechodový odpor, které jsou souhrnně uvedeny v tabulce 3.8. Simulační výpočty pro odladění byly prováděny na modelu odlitku z hliníku a modelu studené formy.

Teplota T [°C]	Var. 1 Čas - t [s]	Var. 2 Čas - t [s]	Prostup tepla β [J.Kg⁻¹.K⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m².K.W⁻¹]
720	2,128	3,75	2500	0,0004
700	2,961	6,25	2500	0,0004
630	10,022	10	1900	0,00053
580	12,035	15	1700	0,000588
550	14,049	18,75	1500	0,0007
500	18,461	23,75	1200	0,00083

Tab. 3.8 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní Al odlitek - forma

Díky výsledkům z těchto výpočtů bylo možné říci, že tepelný přechodový odpor je tepelně-fyzikální veličina, která nejvíce ovlivňuje stabilitu simulačního výpočtu. Z toho důvodu následovaly simulační výpočty pro všechny materiály použité při experimentálních měření viz tab. 3.4.

5.4.5.1 Simulační výpočty - experiment č.1 (hliník)

Simulační výpočty pro čistý hliník proběhly na základě hodnot, jež jsou uvedeny v tabulce 3.9 a 4.0. Hodnoty uvedené v tabulce 4.0 jsou pak graficky zpracovány na **obr. 4.2.3**. Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databáze programu QuikCAST.

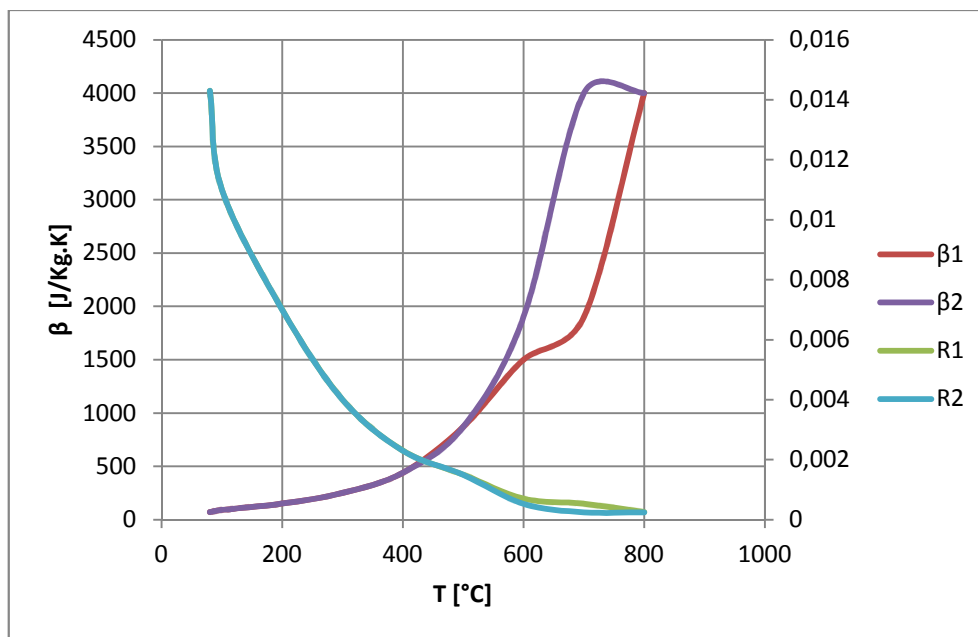
Odléváný kov	Hliník (Al)
Teplota lití [°C]	720
Teplota kokily [°C]	20
Teplota okolí [°C]	20
Teplota dutiny formy [°C]	20
Materiál dna formy	Sibral

Tab. 3.9 Počáteční hodnoty prostředí

Teplota T [°C]	Čas t [s]	Simulace 1		Simulace 2	
		Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]	Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]
800	0	4000	0,00025	4000	0,00025
700	0,25	1900	0,00053	4000	0,00025
600	13,75	1500	0,0007	1900	0,00053
500	23,75	870	0,0015	870	0,0015
400	45	440	0,0023	440	0,0023
300	92,5	250	0,004	250	0,004
200	202,5	150	0,007	150	0,007
100	350	90	0,011	90	0,011
80	400	70	0,0143	70	0,0143

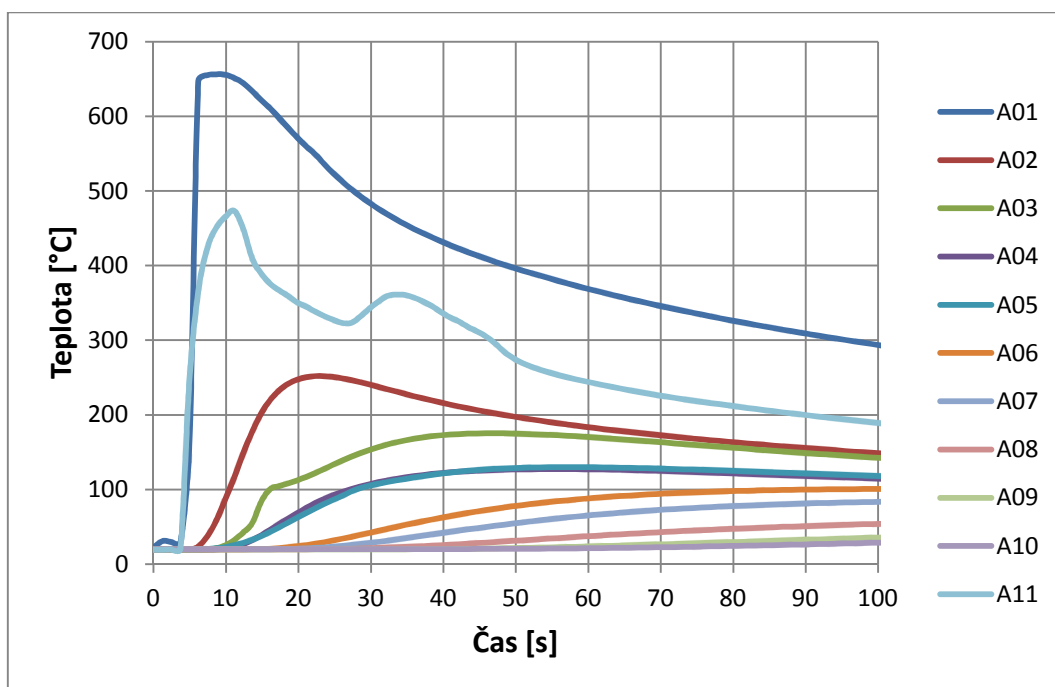
Tab. 4.0 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní Al odlitek - forma

Pro správné určení velikosti součinitele prostupu tepla hliníku odlévaného do studené ocelové kokily bylo provedeno okolo devíti simulačních výpočtů, než byly nalezeny správné velikosti. Poslední dvě určující simulace jsou zapsány v tabulce 4.0, kde nevyhovující je označen červeně.



Obr. 4.2.3 Součinitel prostupu tepla pro rozhraní Al odlitek - forma (graficky)

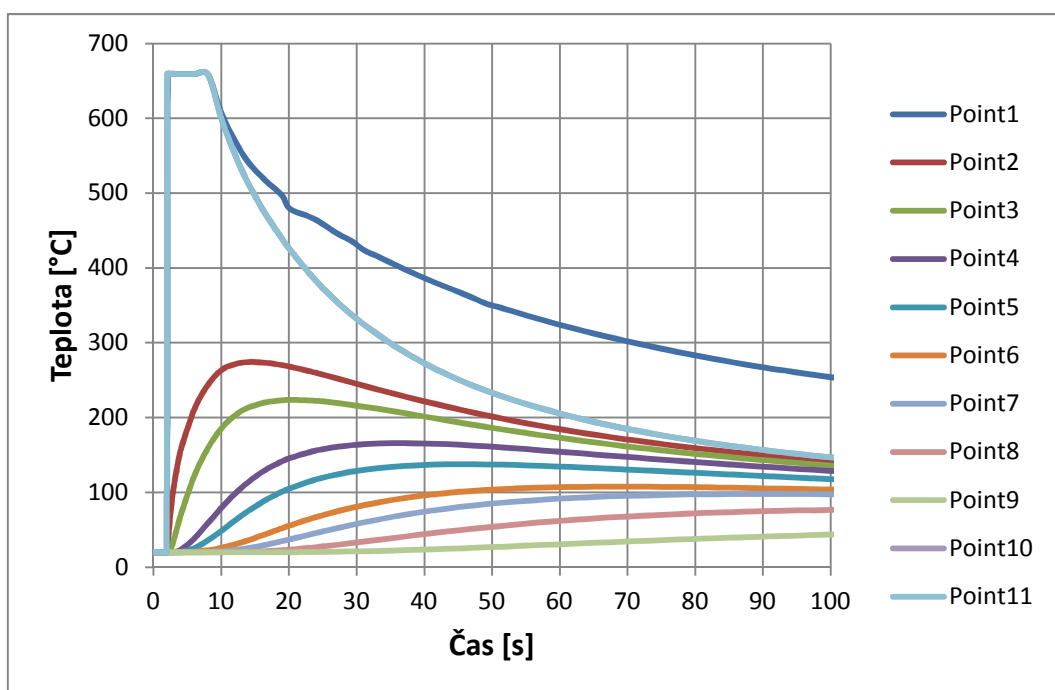
Na **obr. 4.2.4** je uvedena naměřená teplotní závislost pro odlitek tvaru desky z hliníku. Na křivce A11 je dobře vidět výrazné odlehnutí odlitku od formy. Na **obr. 4.2.5** je nasimulovaná teplotní závislost pro stejný materiál. Proces simulace probíhal za stejných podmínek, jaké byly u experimentu. Na nasimulovaných výsledcích je patrné, že využívaný program není schopný simulovat odlehnutí od formy (křivka - point 11).



Obr. 4.2.4 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého hliníku, (naměřeno)

A01 - teplota v tepelné ose odlitku, A02 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, A03 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, A04 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, A05 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, A06 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, A07 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, A08 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, A09 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, A10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, A11 - teplota na lici formy.

Na základě výsledků simulačních výpočtů lze říci, že bylo dosaženo dostatečné shody s experimentem. Nepatrnou úpravu součinitele tepelné vodivosti na formě by uvítala křivka s označením Point 2, která odpovídá 3mm vzdálenosti od líce formy. Nedostatkem se zdá být pouze křivka na lici formy (Point 11), která nelze ovlivnit uživatelským nastavením.

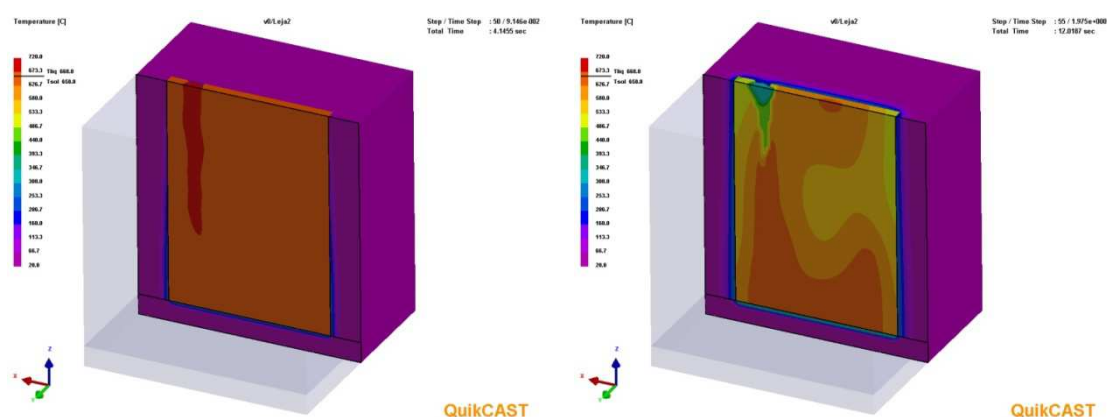


Obr. 4.2.5 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého hliníku, (simulace)

Point1 - teplota v tepelné ose odlitku, Point2 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, Point3 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, Point4 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, Point5 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, Point6 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, Point7 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, Point8 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, Point9 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, Point10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, Point11 - teplota na lici formy.

Po dosažení shody průběhů teplot v odlitku a ve stěně kokily, včetně časové závislosti změny obou teplotních polí, bylo možno pro jednotlivé případy a teplotní podmínky stanovit konkrétní hodnoty součinitele prostupu tepla β (jeho převrácená hodnota udává míru tepelného odporu) viz tab. 4.0 hodnoty pro "**Simulace 2**" (zeleně vyznačené). Na základě této shody byly dále použity všechny hodnoty důležitých veličin i pro simulaci teplotních polí v tuhneoucím odlitku tvaru desky.

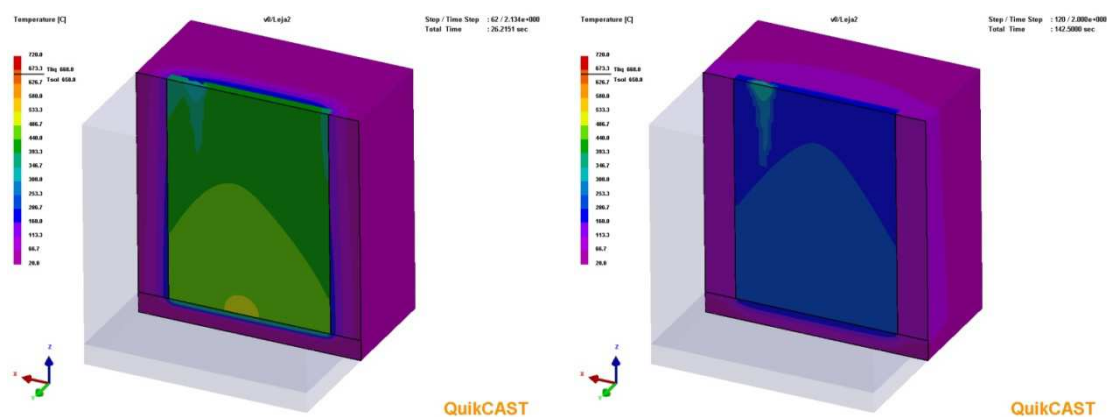
Na **obr. 4.2.6** jsou pro ilustraci uvedeny jednotlivé okamžiky rozložení teplot v odlitku desky, **obr. 4.2.6 a)** okamžik odlití, **obr. 4.2.6 b)** chladnutí odlitku v čase 12 s od začátku lití. Na **obr. 4.2.7** je rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích, **obr. 4.2.7 a)** chladnutí odlitku v čase 26 s od začátku lití, **obr. 4.2.7 b)** chladnutí odlitku v čase 96 s od začátku lití.



a) - okamžik odlití

b) - 12 s po začátku lití

Obr. 4.2.6 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích



a) - 26 s po začátku lití

b) - 96 s po začátku lití

Obr. 4.2.7 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích

5.4.5.2 Simulační výpočty - experiment č.3 (hliník)

Simulační výpočty pro čistý hliník (odlévaný do předehřáté formy), proběhly na základě hodnot, jež jsou uvedeny v tabulce 4.1 a 4.2. Hodnoty uvedené v tabulce 4.2 jsou graficky zpracovány na **obr. 4.2.8**. Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databáze programu QuikCAST.

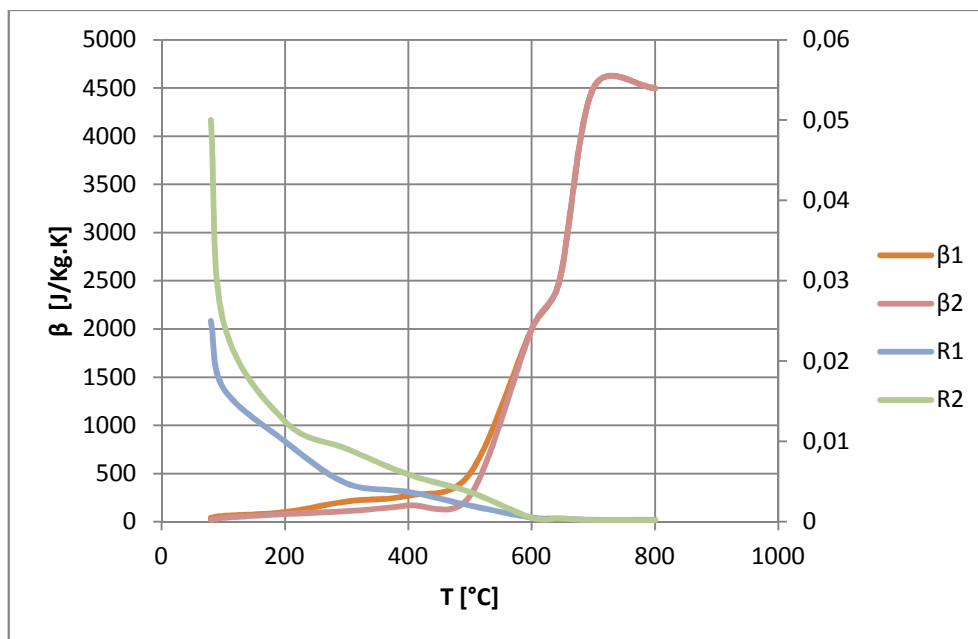
Odléváný kov	Hliník (Al)
Teplota lití [°C]	720
Teplota kokily [°C]	185
Teplota okolí [°C]	20
Teplota dutiny formy [°C]	183
Materiál dna formy	Sibral

Tab. 4.1 Počáteční hodnoty prostředí

Teplota T [°C]	Čas t [s]	Simulace 1		Simulace 2	
		Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]	Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]
800	0	4500	0,000222	4500	0,000222
700	0,00001	4500	0,000222	4500	0,000222
645	8,316	2500	0,0004	2500	0,0004
600	16,979	2000	0,0005	2000	0,0005
500	188,01	500	0,002	270	0,0037
400	232,85	270	0,0037	170	0,005882
300	233,87	210	0,004762	110	0,0090909
200	234,89	100	0,01	80	0,0125
100	235,91	60	0,01666	40	0,025
80	236,93	40	0,025	20	0,05

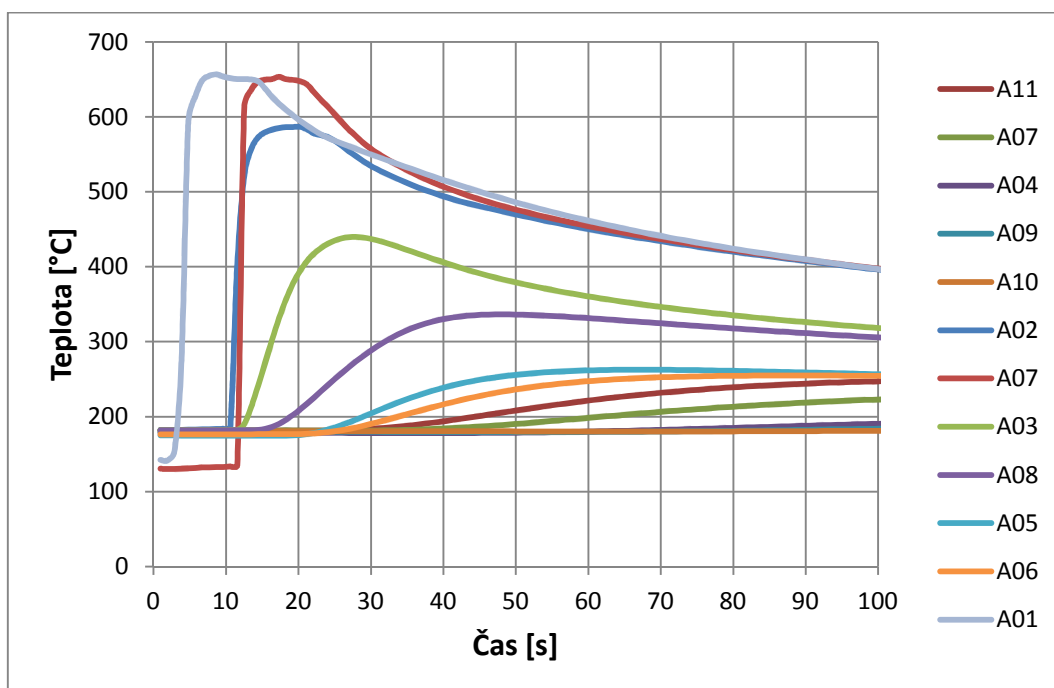
Tab. 4.2 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní Al odlitek - forma

Pro správné určení velikosti součinitele prostupu tepla hliníku odlévaného do předehřáté ocelové kokily bylo provedeno přes dvanáct simulací, než byly nalezeny správné velikosti. Poslední dva pokusy určující velikost součinitele jsou zapsány v tabulce 4.2, kde nevyhovující je označena červeně.



Obr. 4.2.8 Součinitel prostupu tepla pro rozhraní Al odlitek - forma (graficky)

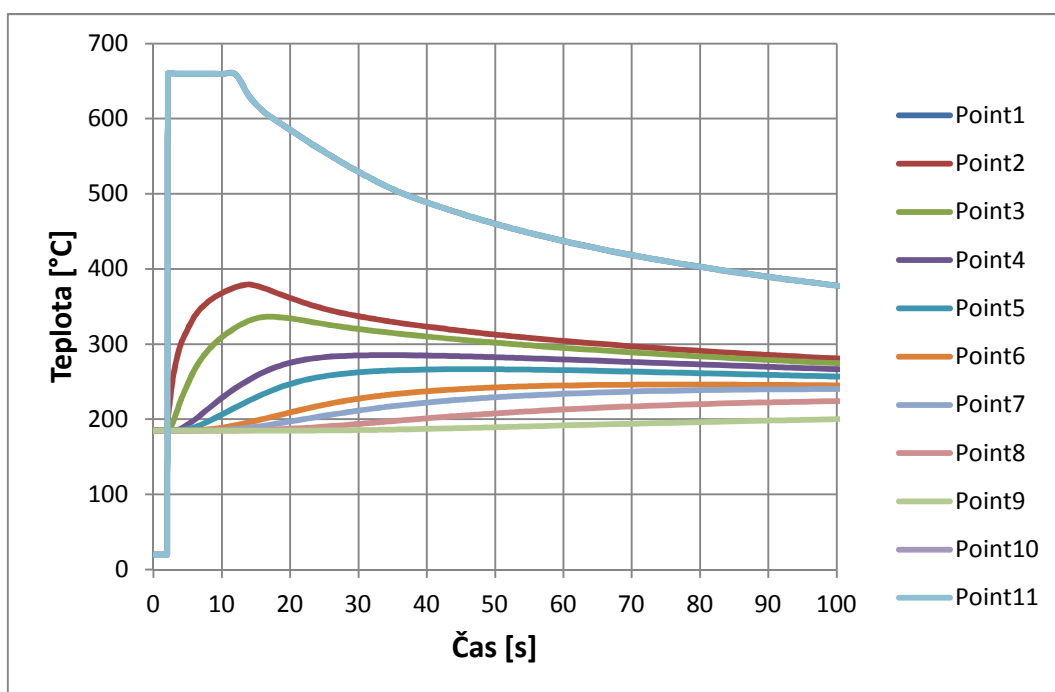
Na **obr. 4.2.9** je uvedena naměřená teplotní závislost pro odlitek tvaru desky z hliníku. Posunutí teploty v ose odlitku bylo způsobeno hlubším uložením kapiláry s termočlánkem A01 v dutině formy. Na **obr. 4.3.0** je nasimulovaná teplotní závislost pro stejný materiál. Proces simulace probíhal pokud možno za stejných podmínek, jaké byly u experimentu.



Obr. 4.2.9 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech předeřáté ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého hliníku, (naměřeno)

A01 - teplota v tepelné ose odlitku, A02 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, A03 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, A04 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, A05 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, A06 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, A07 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, A08 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, A09 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, A10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, A11 - teplota na lici formy.

Nasimulované výsledky teplot v ose odlitku byly prakticky dosaženy, neshoda teplot ve formě je však zřejmá. Přesto na základě těchto výsledků je možné dojít k závěru, že součinitel tepelné vodivosti je opravdu závislý na teplotě (pro formu). Jelikož se jedná o předeřátou formu, bylo by nutné pro úplnou simulaci zmodifikovat hodnoty součinitele tepelné vodivosti.

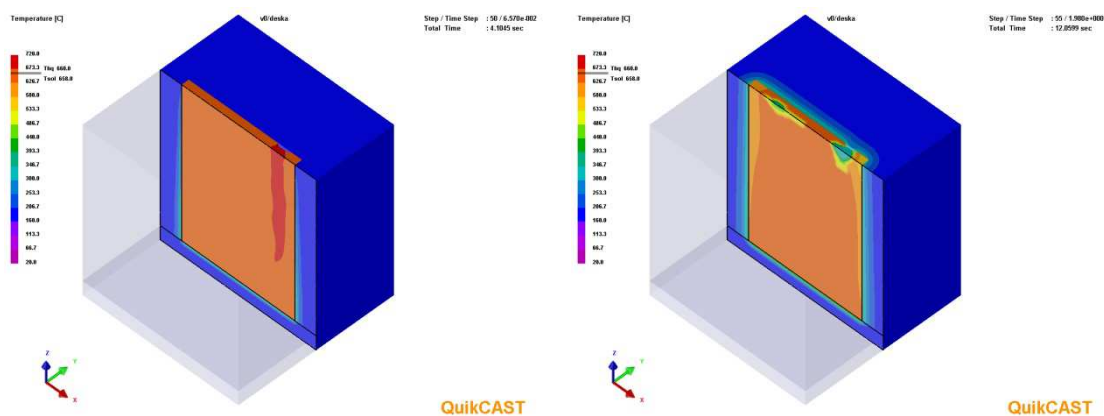


Obr. 4.3.0 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech předeřáté ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého hliníku, (simulace)

Point1 - teplota v tepelné ose odlitku, Point2 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, Point3 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, Point4 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, Point5 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, Point6 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, Point7 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, Point8 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, Point9 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, Point10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, Point11 - teplota na lici formy.

Po dosažení shody průběhů teplot v odlitku a ve stěně kokily, včetně časové závislosti změny obou teplotních polí, bylo možno pro jednotlivé případy a teplotní podmínky stanovit konkrétní hodnoty součinitele prostupu tepla β (jeho převrácená hodnota udává míru tepelného odporu) viz tab. 4.2 hodnoty pro "**Simulace 2**" (zeleně vyznačené). Na základě této shody byly dále použity všechny hodnoty důležitých veličin i pro simulaci teplotních polí v tuhnoucím odlitku tvaru desky.

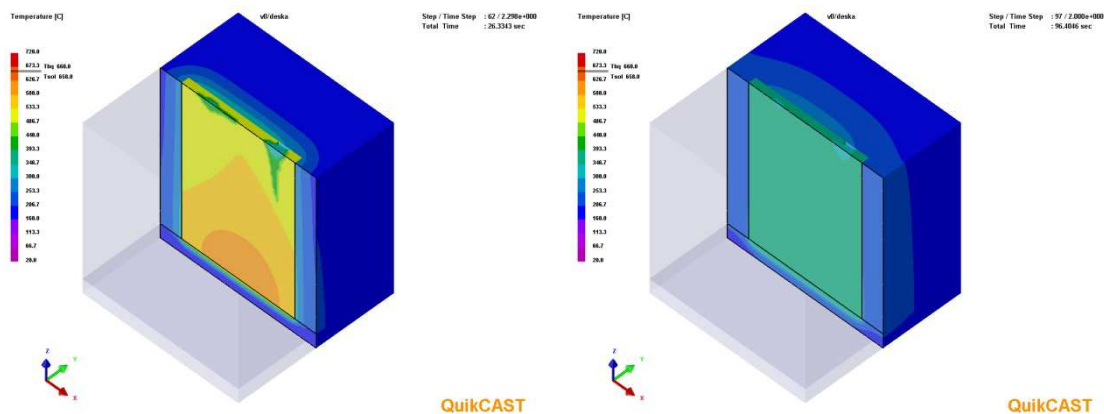
Na **obr. 4.3.1** jsou pro ilustraci uvedeny jednotlivé okamžiky rozložení teplot v odlitku desky, **obr. 4.3.1 a)** okamžik odlití, **obr. 4.3.1 b)** chladnutí odlitku v čase 12 s od začátku lití. Na **obr. 4.3.2** je rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích, **obr. 4.3.2 a)** chladnutí odlitku v čase 26 s od začátku lití, **obr. 4.3.2 b)** chladnutí odlitku v čase 96 s od začátku lití.



a) - okamžik odlití

b) - 12 s po začátku lití

Obr. 4.3.1 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích



a) - 26 s po začátku lití

b) - 96 s po začátku lití

Obr. 4.3.2 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích

5.4.5.3 Simulační výpočty - experiment č.5 (Zinek)

Simulační výpočty pro čistý zinek proběhly na základě hodnot, jež jsou uvedeny v tabulce 4.3 a 4.4. Hodnoty uvedené v tabulce 4.4 jsou graficky zpracovány na **obr. 4.3.3**. Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databáze programu QuikCAST.

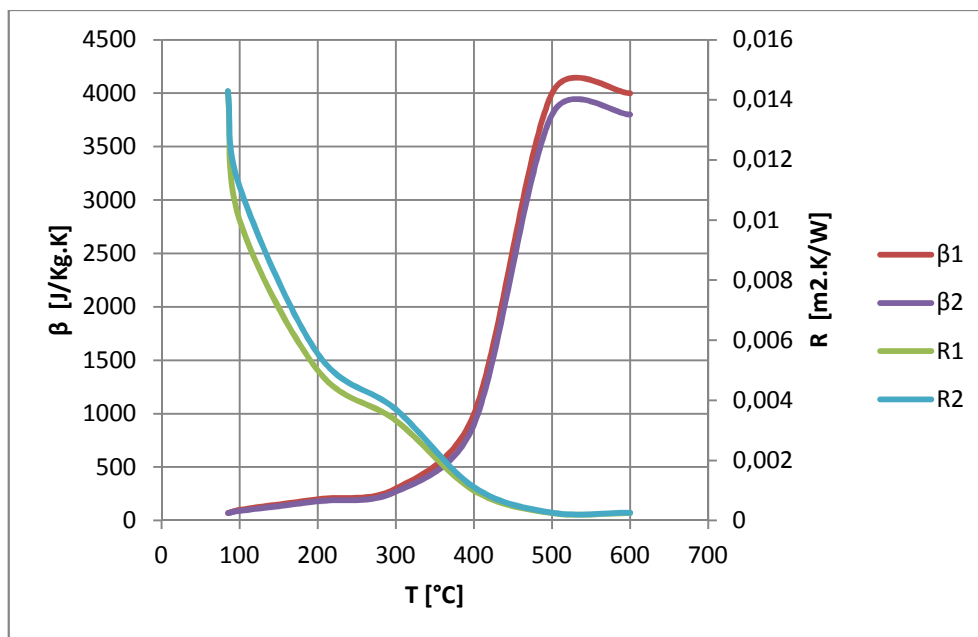
Odléváný kov	Zinek (Zn)
Teplota lití [°C]	490
Teplota kokily [°C]	20
Teplota okolí [°C]	20
Teplota dutiny formy [°C]	20
Materiál dna formy	Sibral

Tab. 4.3 Počáteční hodnoty prostředí

Teplota T [°C]	Čas t [s]	Simulace 1		Simulace 2	
		Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]	Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]
600	0	4000	0,00025	3800	0,000263
500	0,250	4000	0,00025	3800	0,000263
400	14,553	1000	0,001	900	0,001111
300	86,625	300	0,003333	270	0,0037
200	185,031	200	0,005	180	0,00555
100	514,206	100	0,01	90	0,01111
85	720	70	0,014286	70	0,014286

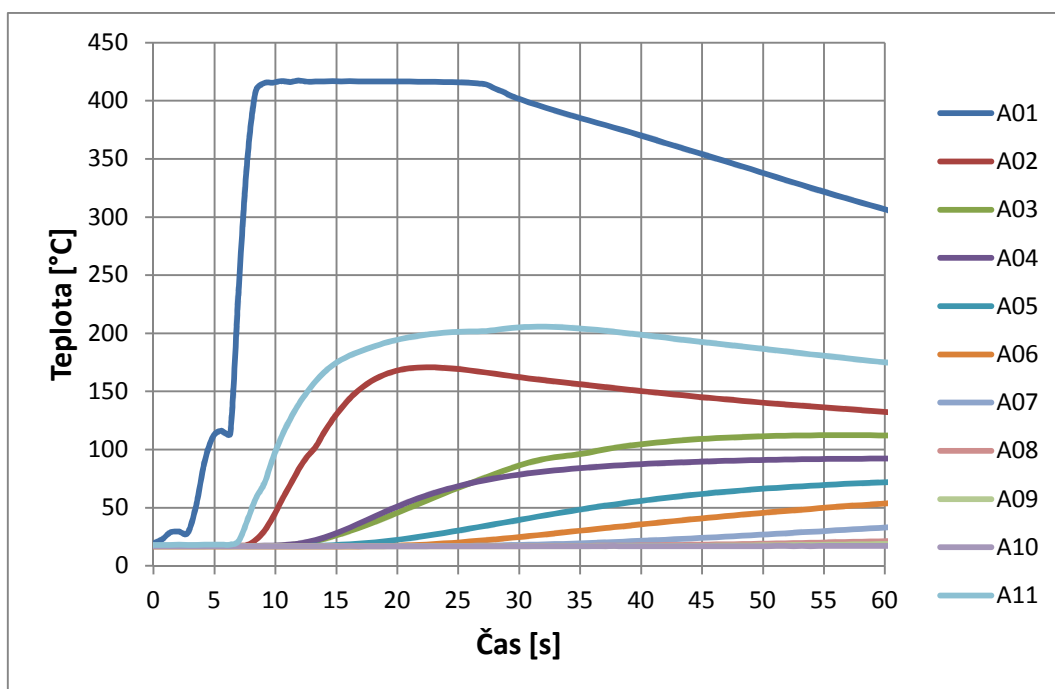
Tab. 4.4 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní Zn odlitek - forma

Pro správné určení velikosti součinitele prostupu tepla zinku odlévaného do studené ocelové formy byly provedeny čtyři simulací, které určili správnou velikost součinitele prostupu tepla. Poslední dvě simulace, které určují velikost součinitele, jsou zapsány v tabulce 4.4, kde nevyhovující je označena červeně.



Obr. 4.3.3 Součinitel prostupu tepla pro rozhraní Zn odlitek - forma (graficky)

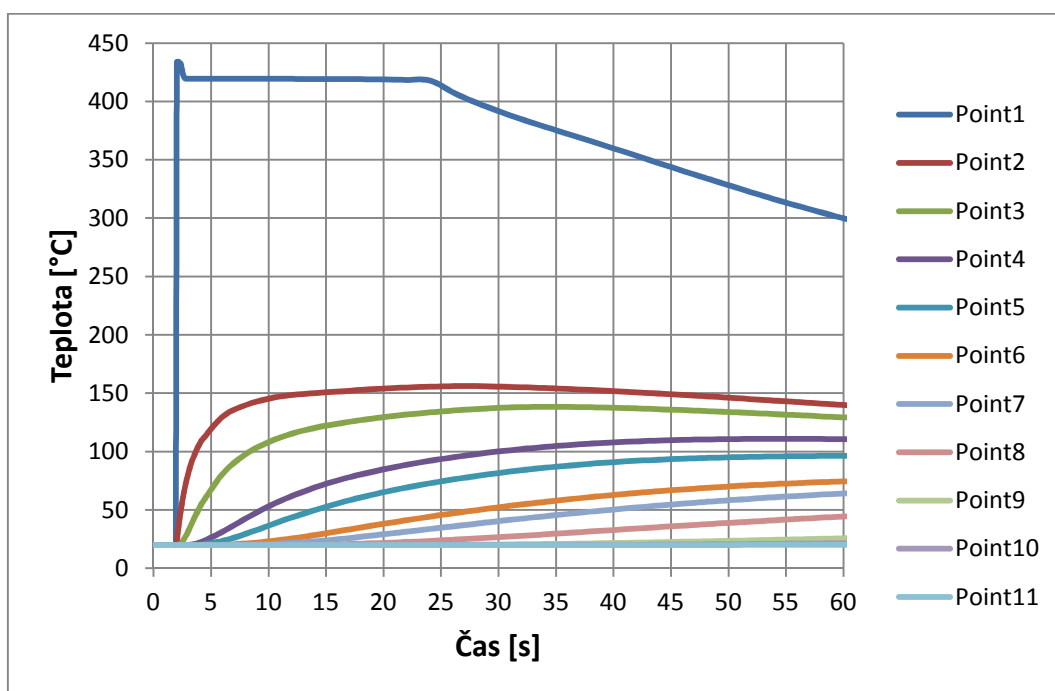
Na **obr. 4.3.4** je uvedena naměřená teplotní závislost pro odlitek tvaru desky ze zinku. Začátek růstu křivky odpovídající teplotě v ose odlitku (A01) je způsobena tokem taveniny odrážející se od stěn na kapiláru s termočlánkem. Na **obr. 4.3.5** je nasimulovaná teplotní závislost pro stejný materiál. Proces simulace probíhal pokud možno za stejných podmínek, jaké byly u experimentu.



Obr. 4.3.4 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého zinku, (naměřeno)

A01 - teplota v tepelné ose odlitku, A02 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, A03 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, A04 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, A05 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, A06 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, A07 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, A08 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, A09 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, A10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, A11 - teplota na lici formy.

Nasimulované výsledky teplot v ose odlitku se drobně liší, přesto byl průběh křivky dosažen. Neshoda teplot ve formě je opět způsobena součinitelem tepelné vodivosti jež dostatečně nepopisuje prostup tepla formou.



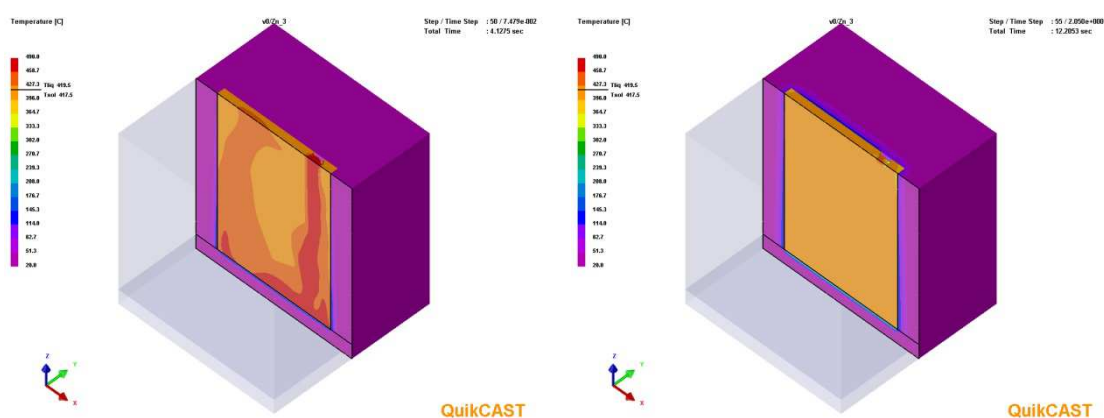
Obr. 4.3.5 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého zinku, (simulace)

Point1 - teplota v tepelné ose odlitku, Point2 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, Point3 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, Point4 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, Point5 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, Point6 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, Point7 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, Point8 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, Point9 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, Point10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, Point11 - teplota na lici formy.

Po dosažení shody průběhů teplot v odlitku a ve stěně kokily, včetně časové závislosti změny obou teplotních polí, bylo možno pro jednotlivé případy a teplotní podmínky stanovit konkrétní hodnoty součinitele prostupu tepla β (jeho převrácená hodnota udává

míru tepelného odporu) viz tab. 4.4 hodnoty pro "*Simulace 2*"(zeleně vyznačené). Na základě této shody byly dále použity všechny hodnoty důležitých veličin i pro simulaci teplotních polí v tuhneoucím odlitku tvaru desky.

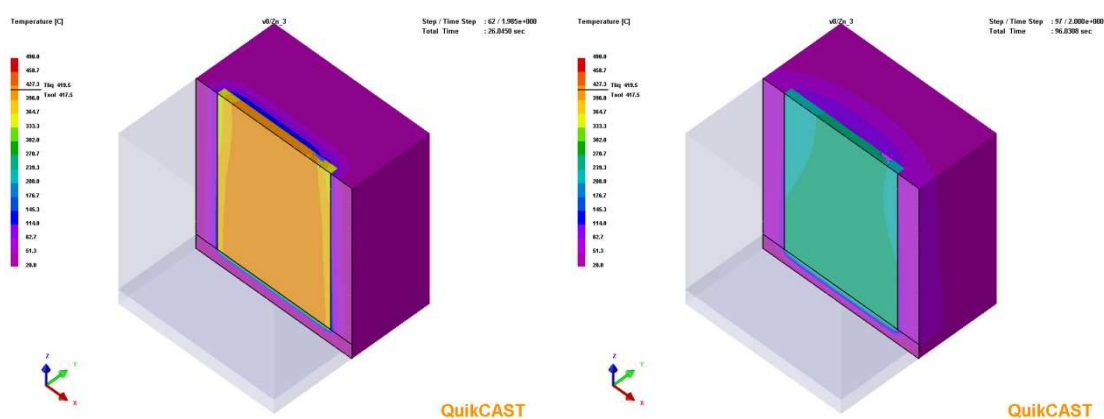
Na **obr. 4.3.6** jsou pro ilustraci uvedeny jednotlivé okamžiky rozložení teplot v odlitku desky, **obr. 4.3.6 a)** okamžik odlití, **obr. 4.3.6 b)** chladnutí odlitku v čase 12 s od začátku lití. Na **obr. 4.3.7** je rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích, **obr. 4.3.7 a)** chladnutí odlitku v čase 26 s od začátku lití, **obr. 4.3.7 b)** chladnutí odlitku v čase 96 s od začátku lití.



a) - okamžik odlití

b) - 12 s po začátku lití

Obr. 4.3.6 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích



a) - 26 s po začátku lití

b) - 96 s po začátku lití

Obr. 4.3.7 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích

5.4.5.4 Simulační výpočty - experiment č.8 (Zinek)

Simulace pro čistý zinek proběhly na základě hodnot, jež jsou uvedeny v tabulce 4.5 a 4.6. Hodnoty uvedené v tabulce 4.6 jsou graficky zpracovány na **obr. 4.3.8**. Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databáze programu QuikCAST.

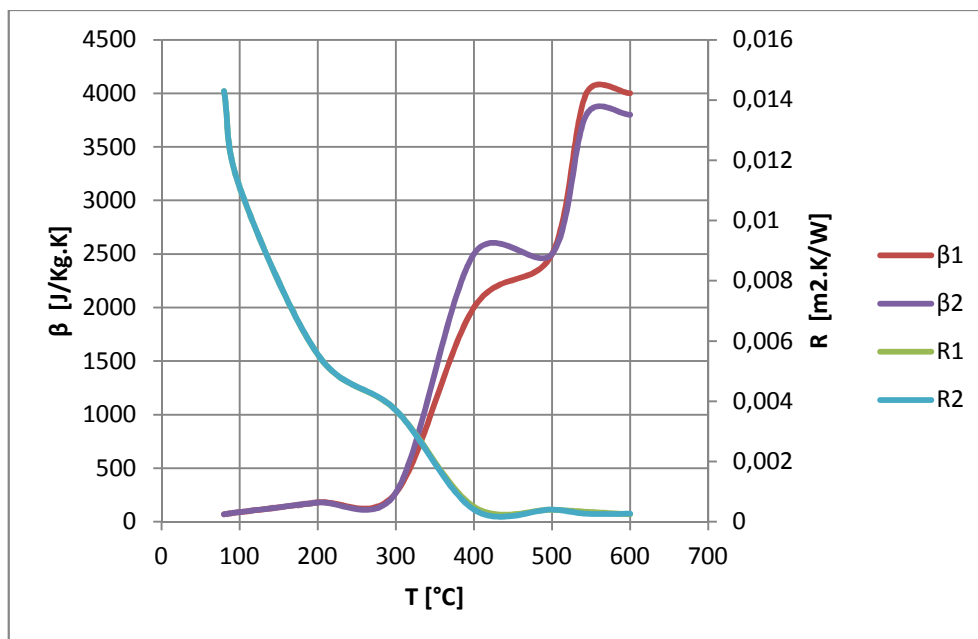
Odléváný kov	Zinek (Zn)
Teplota lití [°C]	580
Teplota kokily [°C]	320
Teplota okolí [°C]	20
Teplota dutiny formy [°C]	280
Materiál dna formy	Sibral

Tab. 4.5 Počáteční hodnoty prostředí

Teplota T [°C]	Čas t [s]	Simulace 1		Simulace 2	
		Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]	Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]
600	0	4000	0,00025	3800	0,00026
544	7,623	4000	0,000333	3800	0,00026
500	11,3	2500	0,0004	2500	0,0004
400	148,3	2000	0,0005	2500	0,0004
300	987,164	270	0,0037	270	0,0037
200	2587,164	180	0,00555	180	0,00555
100	4187,164	90	0,01111	90	0,01111
80	5467,164	70	0,01429	70	0,01429

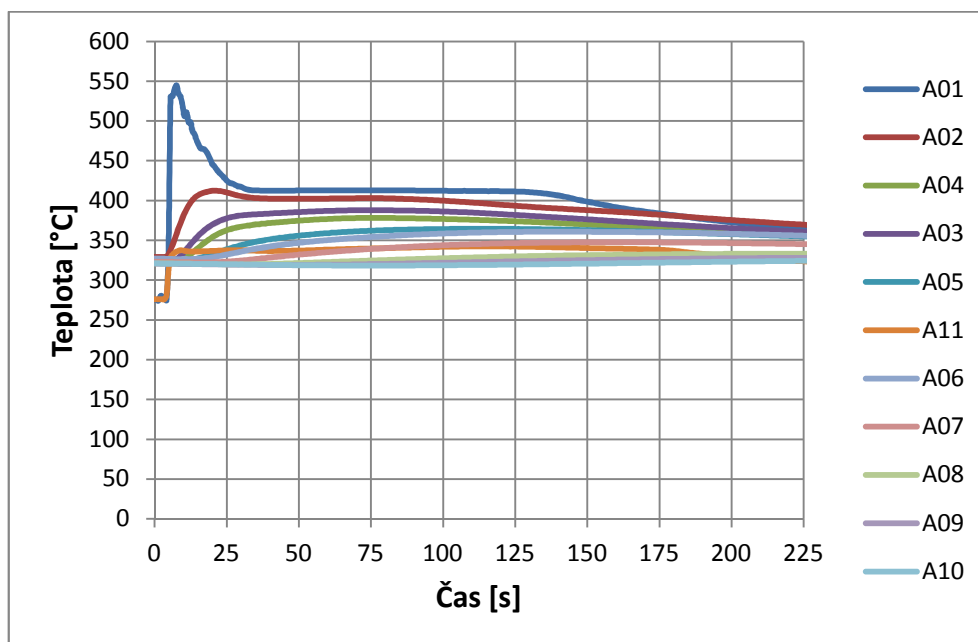
Tab. 4.6 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní Zn odlitek - forma

K určení velikosti součinitele prostupu tepla zinku odlévaného do předehřáté ocelové formy, stačili dva simulační výpočty, které byly zapsány do tabulky 4.6 a kde nevyhovující hodnoty byly označeny červeně.



Obr. 4.3.8 Součinitel prostupu tepla pro rozhraní Zn odlitek - forma (graficky)

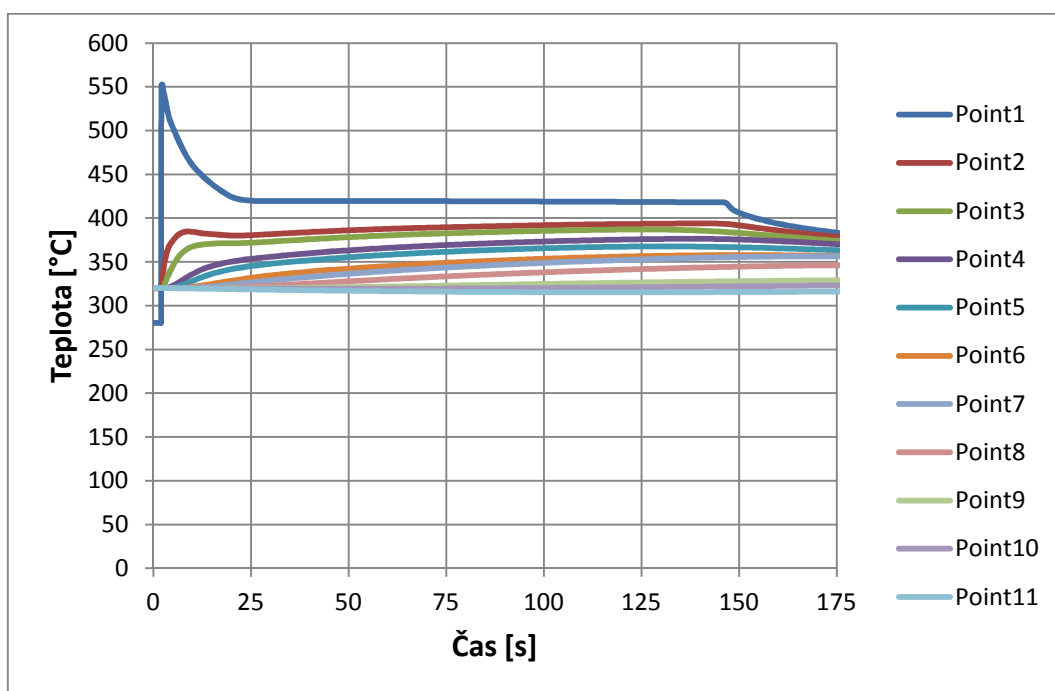
Na **obr. 4.3.9** je uvedena naměřená teplotní závislost pro odlitek tvaru desky ze zinku. Nevýrazná teplota na lici formy byla zapříčiněna nesprávnou polohou kapiláry ve formě. To mělo za následek snímání pouze sálavého tepla, nikoliv tepla na lici formy předávaného od odlitku. Na **obr. 4.4.0** je nasimulovaná teplotní závislost pro stejný materiál. Proces simulace probíhal pokud možno za stejných podmínek, jaké byly u experimentu.



Obr. 4.3.9 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech přehřáté ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého zinku, (naměřeno)

A01 - teplota v tepelné ose odlitku, A02 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, A03 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, A04 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, A05 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, A06 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, A07 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, A08 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, A09 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, A10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, A11 - teplota na lici formy.

Výsledky simulačních výpočtů je možné označit za dostatečně shodné s experimentem. Opět je zde vidět drobná potřeba úpravy součinitele tepelné vodivosti na formě, tak aby bylo dosaženo dostatečné schody teplot i ve formě.



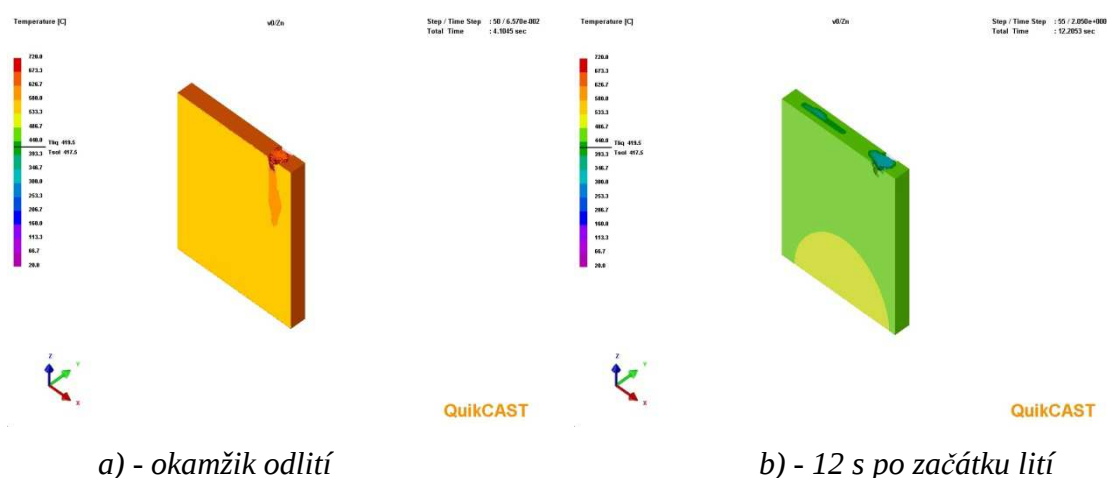
Obr. 4.4.0 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech předeřtáté ocelové kokily, odlitek tvaru desky z čistého zinku, (simulace)

Point1 - teplota v tepelné ose odlitku, Point2 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, Point3 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, Point4 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, Point5 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, Point6 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, Point7 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, Point8 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, Point9 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, Point10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, Point11 - teplota na lici formy.

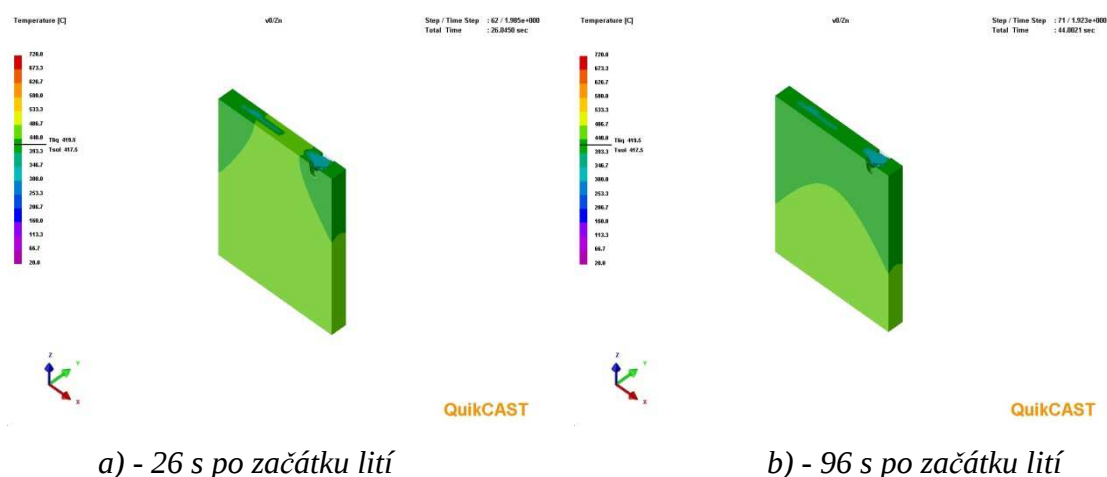
Po dosažení shody průběhů teplot v odlitku a ve stěně kokily, včetně časové závislosti změny obou teplotních polí, bylo možno pro jednotlivé případy a teplotní podmínky stanovit konkrétní hodnoty součinitele prostupu tepla β (jeho převrácená hodnota udává

míru tepelného odporu) viz tab. 4.6 hodnoty pro "*Simulace 2*"(zeleně vyznačené). Na základě této shody byly dále použity všechny hodnoty důležitých veličin i pro simulaci teplotních polí v tuhneoucím odlitku tvaru desky.

Na **obr. 4.4.1** jsou pro ilustraci uvedeny jednotlivé okamžiky rozložení teplot v odlitku desky, **obr. 4.4.1 a)** okamžik odlití, **obr. 4.4.1 b)** chladnutí odlitku v čase 12 s od začátku lití. Na **obr. 4.4.2** je rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích, **obr. 4.4.2 a)** chladnutí odlitku v čase 26 s od začátku lití, **obr. 4.4.2 b)** chladnutí odlitku v čase 96 s od začátku lití.



Obr. 4.4.1 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích



Obr. 4.4.2 Rozložení teplot v odlitku v určitých časových okamžicích

5.4.5.5 Simulační výpočty - experiment č.9 (Slitina AlSi12)

Simulace pro slitinu hliníku proběhly na základě hodnot, jež jsou uvedeny v tabulce 4.7 a 4.8. Hodnoty uvedené v tabulkách 4.8 a 4.9 jsou graficky zpracovány na **obr. 4.4.3**. Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databáze programu QuikCAST.

Odléváný kov	Slitina (AlSi12)
Teplota lití [°C]	720
Teplota kokily [°C]	20
Teplota okolí [°C]	20
Teplota dutiny formy [°C]	20
Materiál dna formy	Sibral

Tab. 4.7 Počáteční hodnoty prostředí

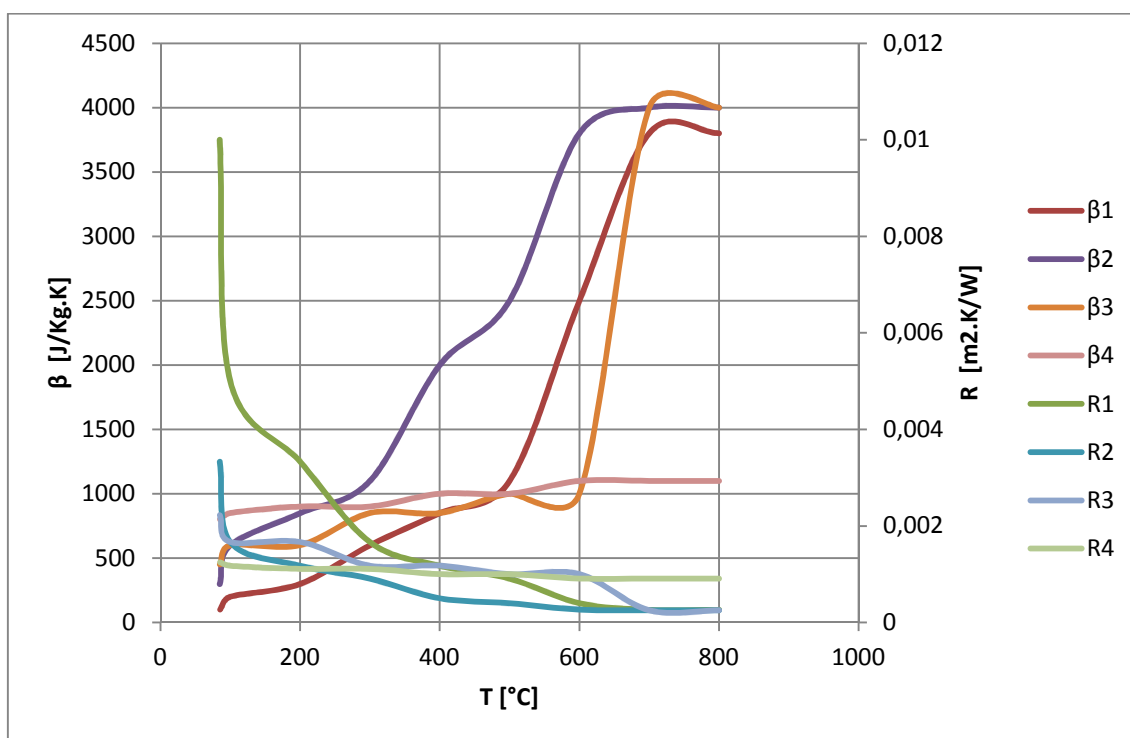
Teplota T [°C]	Čas t [s]	Simulace 1		Simulace 2	
		Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]	Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]
800	0	3800	0,000263	4000	0,00025
700	9,009	3800	0,000263	4000	0,00025
600	21,483	2500	0,0004	3800	0,000263
500	59,798	1100	0,000909	2500	0,0004
400	75,54	850	0,001176	2000	0,0005
300	112,26	600	0,001667	1100	0,000909
200	202,356	300	0,003333	850	0,001176
100	613,998	200	0,005	600	0,001667
85	1026,33	100	0,01	300	0,003333

Tab. 4.8 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní AlSi12 odlitek - forma

Pro určení součinitele prostupu tepla u slitiny hliníku odlévané do studené ocelové formy bylo provedeno přes dvanáct simulací než byly nalezeny správné hodnoty součinitele. To je patrné z tabulek 4.8 a 4.9, které obsahují i výsledné hodnoty tepelného přechodového odporu s označením "**Simulace 4**" (zeleně vyznačené), nevyhovující jsou označeny červeně.

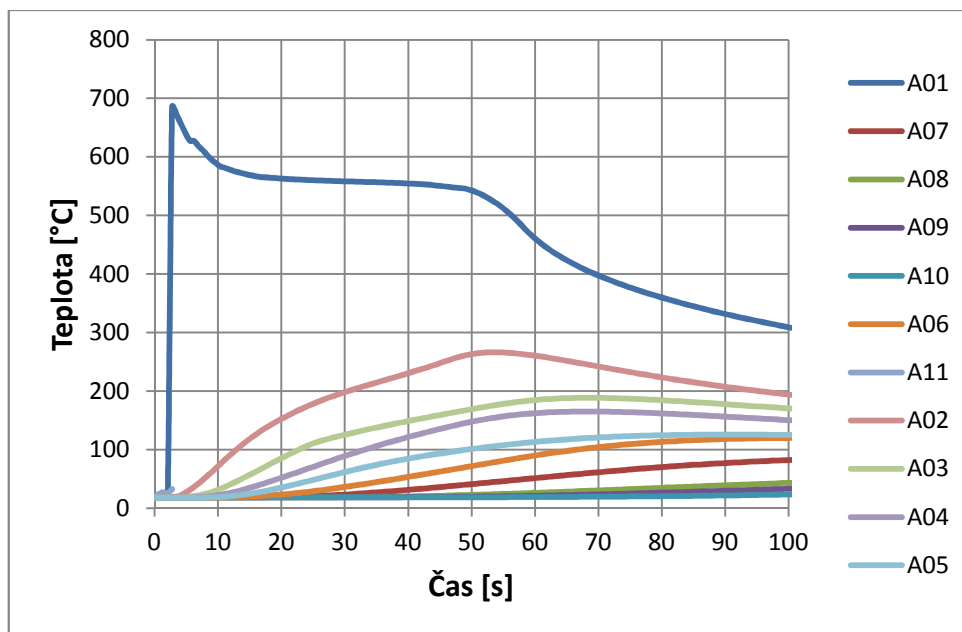
Teplota $T [^{\circ}\text{C}]$	Čas $t [\text{s}]$	Simulace 3		Simulace 4	
		Prostup tepla $\beta [\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Tepelný přechodový odpor $R [\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}]$	Prostup tepla $\beta [\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Tepelný přechodový odpor $R [\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}]$
800	0	4000	0,00025	1100	0,000909
700	9,009	4000	0,00025	1100	0,000909
600	21,483	1000	0,001	1100	0,000909
500	59,798	1000	0,001	1000	0,001
400	75,54	850	0,001176	1000	0,001
300	112,26	850	0,001176	900	0,001111
200	202,356	600	0,001666	900	0,001111
100	613,998	600	0,001666	850	0,001176
85	1026,33	450	0,00222	800	0,00125

Tab. 4.9 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní AlSi12 odlitek - forma



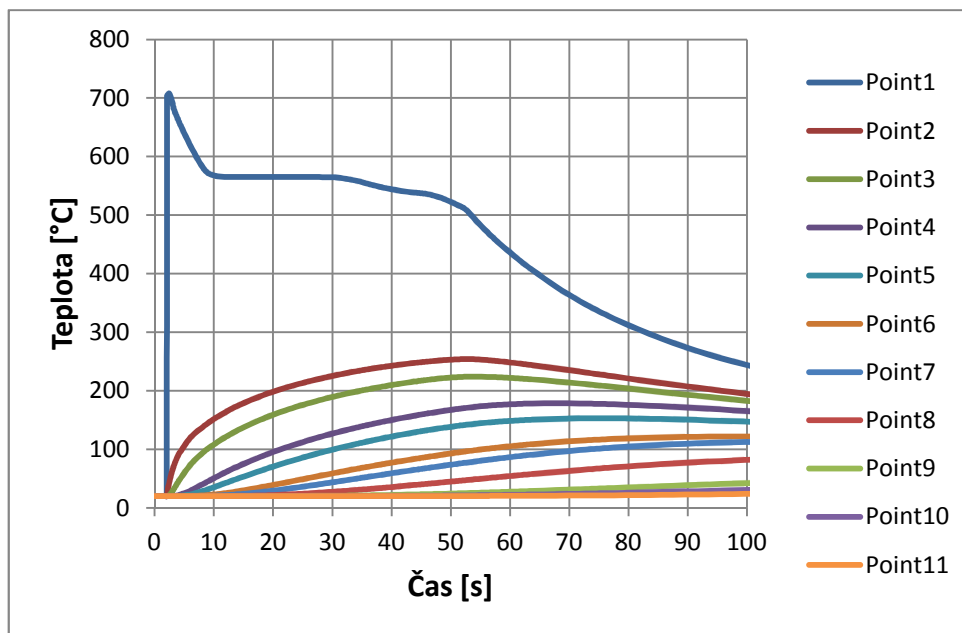
Obr. 4.4.3 Součinitel prostupu tepla pro rozhraní AlSi12 odlitek - forma (graficky)

Na **obr. 4.4.4** je uvedena naměřená teplotní závislost pro odlitek tvaru desky ze zinku. Na **obr. 4.4.5** je nasimulovaná teplotní závislost pro stejný materiál. Proces simulace probíhal pokud možno za stejných podmínek, jaké byly u experimentu. Výsledky simulačních výpočtů jsou dostatečně shodné v porovnání s experimentem.



Obr. 4.4.4 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech ocelové kokily, odlitek tvaru desky ze slitiny hliníku, (naměřeno)

A01 - teplota v tepelné ose odlitku, A02 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, A03 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, A04 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, A05 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, A06 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, A07 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, A08 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, A09 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, A10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, A11 - teplota na lici formy.



Obr. 4.4.5 Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech ocelové kokily, odlitek tvaru desky ze slitiny hliníku, (simulace)

Point1 - teplota v tepelné ose odlitku, Point2 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, Point3 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, Point4 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, Point5 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, Point6 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, Point7 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, Point8 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, Point9 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, Point10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, Point11 - teplota na lici formy.

Po dosažení shody průběhů teplot v odlitku a ve stěně kokily, včetně časové závislosti změny obou teplotních polí, bylo možno pro jednotlivé případy a teplotní podmínky stanovit konkrétní hodnoty součinitele prostupu tepla β (jeho převrácená hodnota udává míru tepelného odporu). Na základě této shody byly dále použity všechny hodnoty důležitých veličin i pro simulaci teplotních polí v tuhoucím odlitku tvaru desky.

5.4.5.6 Simulační výpočty - experiment č.10 (Slitina AlSi12)

Simulace pro slitinu hliníku proběhly na základě hodnot, jež jsou uvedeny v tabulce 5.0 a 5.1. Hodnoty uvedené v tabulkách 5.1 jsou graficky zpracovány na **obr. 4.4.6**. Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databáze programu QuikCAST.

Odléváný kov	Slitina (AlSi12)
Teplota lití [°C]	660
Teplota kokily [°C]	340
Teplota okolí [°C]	20
Teplota dutiny formy [°C]	300
Materiál dna formy	Sibral

Tab. 5.0 Počáteční hodnoty prostředí

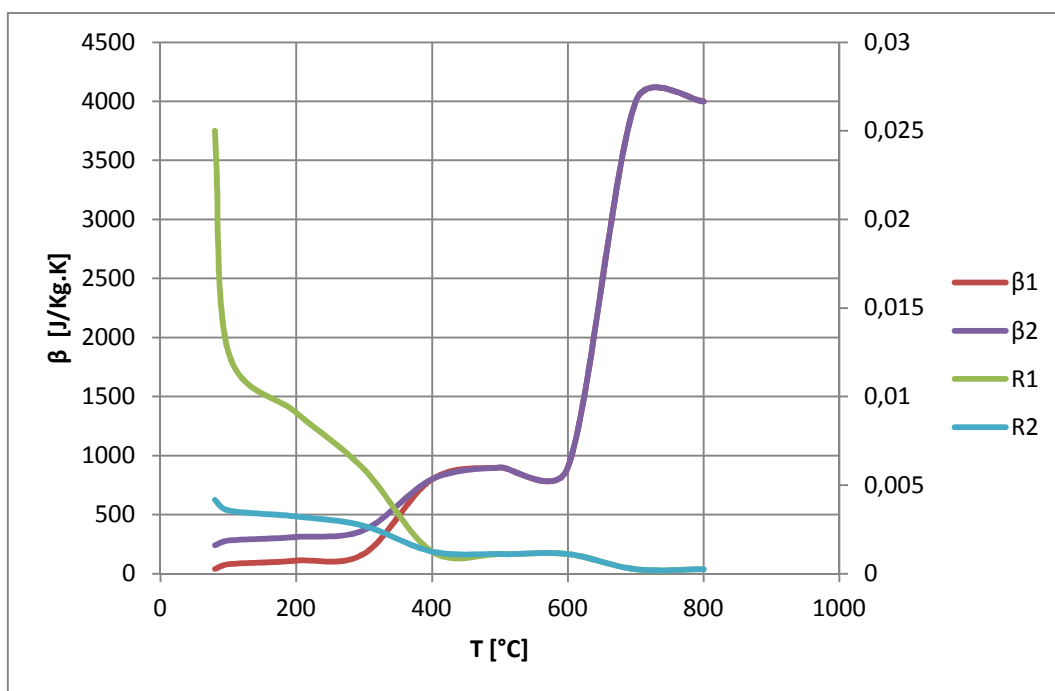
Teplota T [°C]	Čas t [s]	Simulace 1		Simulace 2	
		Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]	Prostup tepla β [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelný přechodový odpor R [m ² .K.W ⁻¹]
800	0	4000	0,00025	4000	0,00025
700	0,00001	4000	0,00025	4000	0,00025
600	5,89	900	0,00111	900	0,00111
500	154,539	900	0,00111	900	0,00111
400	355,509	800	0,00125	800	0,00125
300	1485,589	170	0,0058823	370	0,0027
200	2885,589	110	0,009091	310	0,00323
100	4285,589	80	0,0125	280	0,00357
80	5405,589	40	0,025	240	0,00417

Tab. 5.1 Hodnoty součinitele prostupu tepla pro rozhraní AlSi12 odlitek - forma

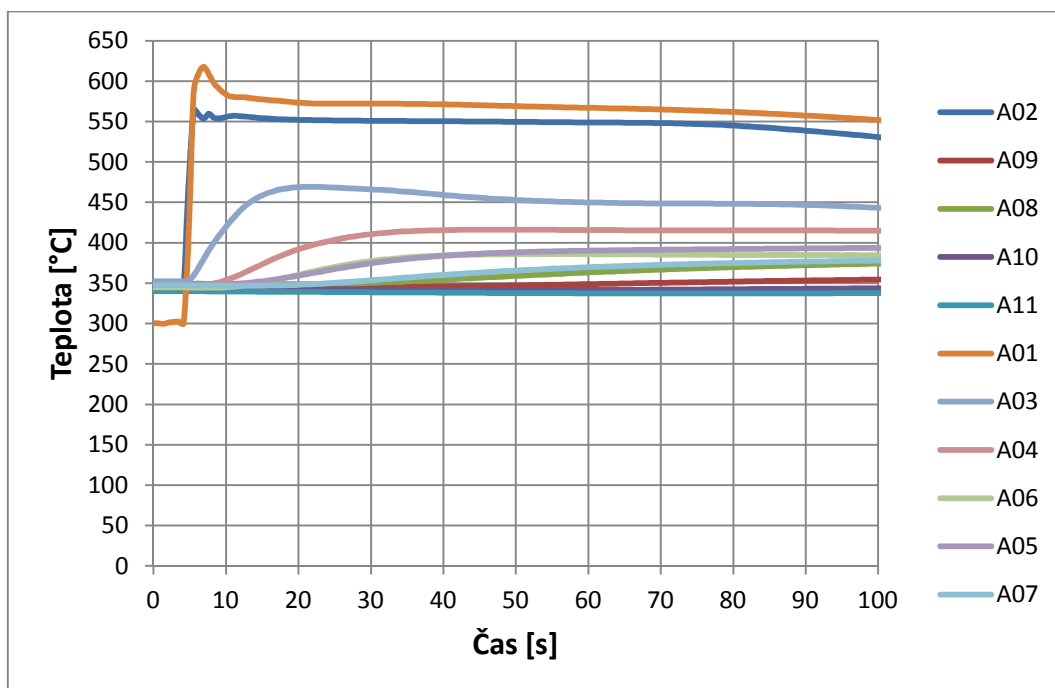
K určení velikosti součinitele prostupu tepla pro slitinu hliníku odlévanou do předeřtuté ocelové formy stačili dva simulační výpočty, které byly zapsány do tabulky 5.1 a kde nevyhovující hodnoty byly označeny červeně.

Na **obr. 4.4.7 a)** je uvedena naměřená teplotní závislost pro odlitek tvaru desky ze zinku. Na **obr. 4.4.7 b)** je nasimulovaná teplotní závislost pro stejný materiál. Proces simulace probíhal za stejných podmínek, jaké byly u experimentu. Nasimulované

výsledky teplot se v ose odlitku a na líci formy drobně liší, přesto byl průběh křivky dosažen. Neshoda teplot ve formě je opět způsobena součinitelem tepelné vodivosti jež dostatečně nepopisuje prostup tepla formou.

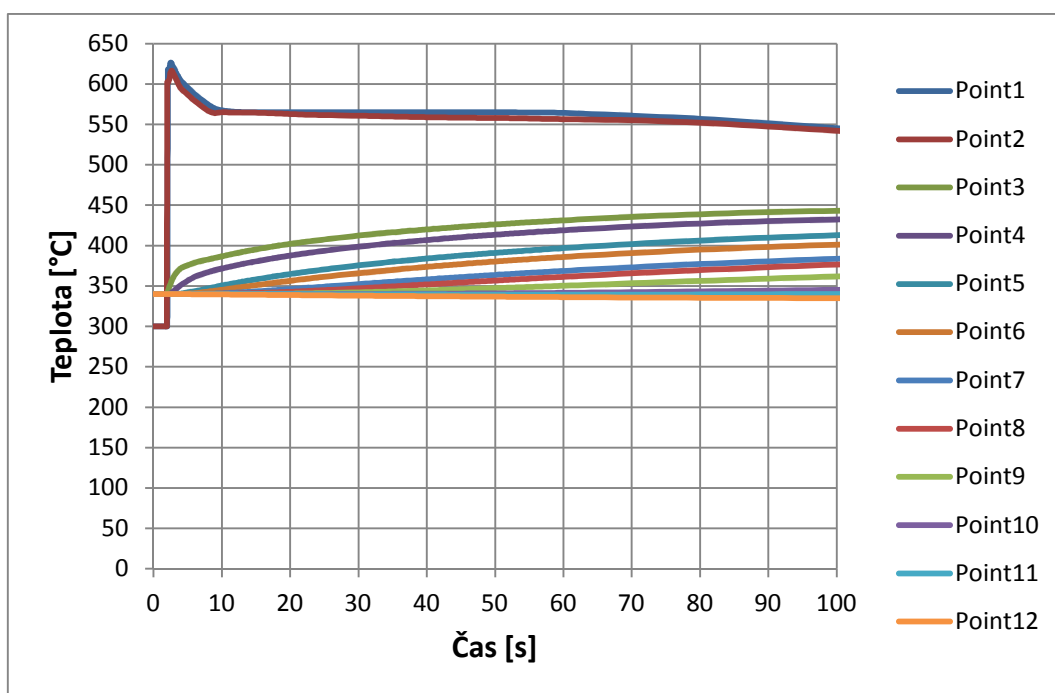


Obr. 4.4.6 Součinitel prostupu tepla pro rozhraní AlSi12 odlitek - forma (graficky)



Obr. 4.4.7 a) Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech předeřáté ocelové kokily, odlitek tvaru desky ze slitiny hliníku, (naměřeno)

A01 - teplota v tepelné ose odlitku, A02 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, A03 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, A04 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, A05 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, A06 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, A07 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, A08 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, A09 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, A10 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy, A11 - teplota na lici formy.



Obr. 4.4.7 b) Časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v určitých místech předeřáté ocelové kokily, odlitek tvaru desky ze slitiny hliníku, (simulace)

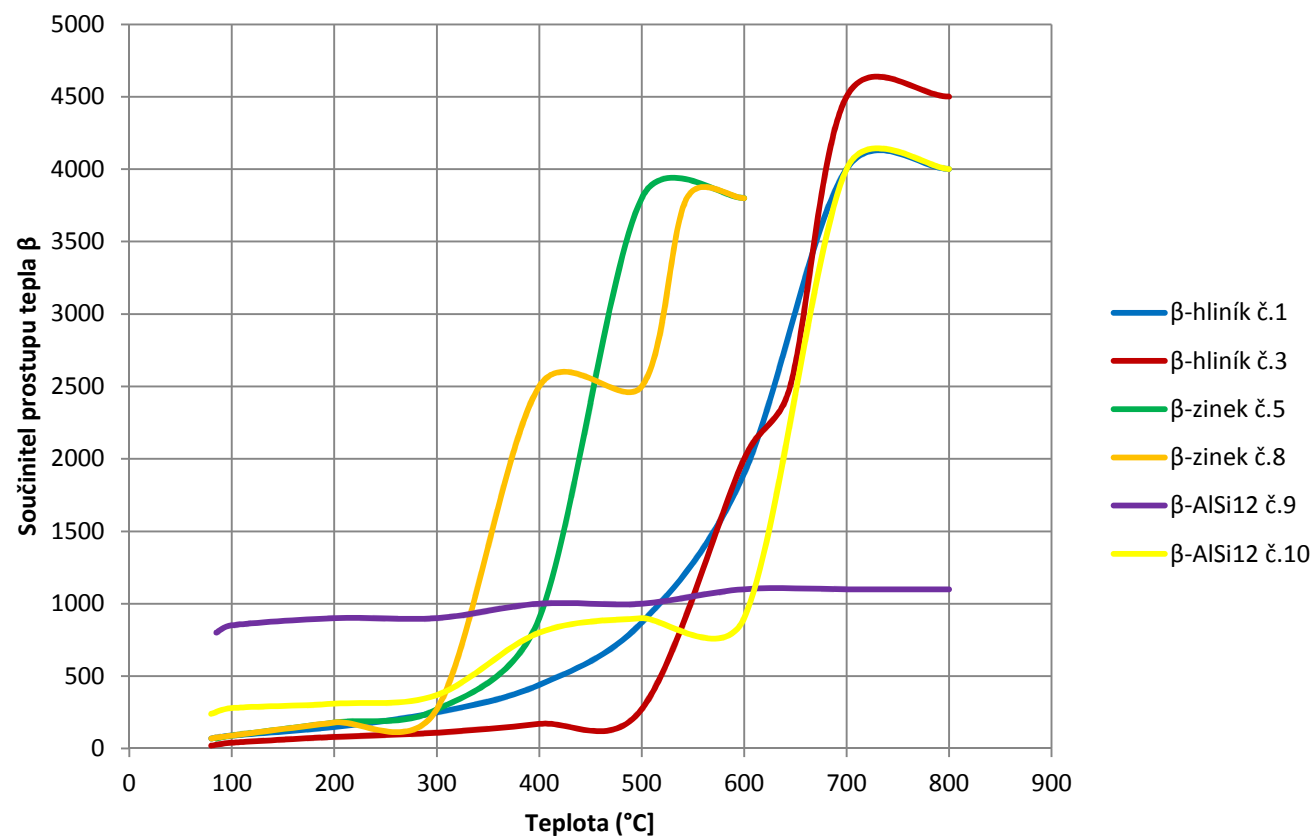
Point1 - teplota v tepelné ose odlitku, Point2 - teplota na lici formy, Point3 - teplota ve vzdálenosti 3mm od líce formy, Point4 - teplota ve vzdálenosti 10mm od líce formy, Point5 - teplota ve vzdálenosti 15mm od líce formy, Point6 - teplota ve vzdálenosti 22mm od líce formy, Point7 - teplota ve vzdálenosti 30mm od líce formy, Point8 - teplota ve vzdálenosti 40mm od líce formy, Point9 - teplota ve vzdálenosti 55mm od líce formy, Point10 - teplota ve vzdálenosti 70mm od líce formy, Point11 - teplota ve vzdálenosti 85mm od líce formy.

Po dosažení shody průběhů teplot v odlitku a ve stěně kokily, včetně časové závislosti změny obou teplotních polí, bylo možno pro jednotlivé případy a teplotní podmínky stanovit konkrétní hodnoty součinitele prostupu tepla β (jeho převrácená hodnota udává míru tepelného odporu). Na základě této shody byly dále použity všechny hodnoty důležitých veličin i pro simulaci teplotních polí v tuhacím odlitku tvaru desky.

V tabulce 5.2 a na obrázku 4.4.8 jsou souhrnně uvedeny veškeré součinitelé prostupu tepla, které byly použity při dosažení dostatečně shodných výsledků ze simulací vs. experiment.

Číslo tavby	1		3		5		8		9		10	
Materiál odlitku	Hliník Al		Hliník Al		Zinek Zn		Zinek Zn		Slitina AlSi12		Slitina AlSi12	
Teplota lití	720		720		490		580		725		660	
Teplota kokily	20		185		20		320		20		340	
T [°C]	Součinitel prostupu tepla a Tepelný přechodový odpor v závislosti na teplotě [β = f(T), 1/β = f(T)]											
	β	R	β	R	β	R	β	R	β	R	β	R
800	4000	0,00025	4500	0,00022	-	-	-	-	1100	0,00091	4000	0,00025
700	4000	0,00025	4500	0,00022	-	-	-	-	1100	0,00091	4000	0,00025
645	-	-	2500	0,0004	-	-	-	-	-	-	-	-
600	1900	0,00053	2000	0,0005	3800	0,00026	3800	0,00026	1100	0,00091	900	0,00111
544	-	-	-	-	-	-	3800	0,00026	-	-	-	-
500	870	0,0015	270	0,0037	3800	0,00026	2500	0,0004	1000	0,001	900	0,00111
400	440	0,0023	170	0,00588	900	0,00111	2500	0,0004	1000	0,001	800	0,00125
300	250	0,004	110	0,00909	270	0,0037	270	0,0037	900	0,00111	370	0,0027
200	150	0,007	80	0,0125	180	0,00555	180	0,00555	900	0,00111	310	0,00323
100	90	0,011	40	0,025	90	0,01111	90	0,01111	850	0,00118	280	0,00357
85	-	-	-	-	70	0,01429	-	-	800	0,00125	-	-
80	70	0,0143	20	0,05	-	-	70	0,01429	-	-	240	0,00417

Tab. 5.2 Souhrnný přehled základních podmínek experimentů a příslušných součinitelů prostupu tepla β a tepelných přechodových odporů v závislosti na teplotě



Obr. 4.4.8 Souhrnný přehled příslušných součinitelů prostupu tepla β v závislosti na teplotě

5.5 Souhrn simulačních výpočtů

Z výsledků simulačních výpočtů pro časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a kokile je vidět, že průběhy se v ose odlitku v konečném důsledku shodují s naměřenými experimenty. Rozdíly v průbězích jednotlivých teplotních křivek pro kokilu jsou dány nepatrnými detaily. Jelikož program QuikCAST využívá pro výpočet vedení a proudění tepla stejných rovnic, předpokládá se tedy vliv součinitele tepelné vodivosti na celkový průběh teplotních křivek v důsledku rychlosti šíření tepla směrem od líce formy k okraji formy. Zároveň je nutné si uvědomit, že i shoda jednotlivých činitelů má vliv na celkovou shodu naměřených a nasimulovaných časových závislostí teplot. Mezi ovlivňující činitel můžeme zařadit např.: dobu a teplotu lití, dobu a teplotu tuhnutí odlitku, charakter a průběh jeho chladnutí. A právě na základě těchto činitelů byly řešeny a odlaďovány simulační výpočty. To opět vedlo k závěru, že pro shodu je nutno posuzovat souvislost těchto činitelů jednotlivě, ale i jako celek.

Všechno toto dává možnost porovnávat na základě fyzikálního modelu, výsledné simulační výpočty s teoreticky velmi náročnými experimenty, které se řídí přírodními zákonitostmi. Mezi ně opět můžeme zařadit prodění, tuhnutí a chladnutí taveniny, sdílení tepla, také silně ovlivňující vznikající vzduchová mezera. Právě proto se simulační výpočty stávají pro experimenty z hlediska fyzikálního popisu tak složité.

Při simulačních výpočtech byla snaha začlenit všechny důležité faktory, tak aby odchylky nasimulovaných a naměřených teplotních charakteristik byly co nejmenší a současně byl zachován průběh jednotlivých křivek, včetně časového rozsahu (délky) při tuhnutí, zejména pak u čistých kovů a siluminu. Mezi v celku dobře nasimulované hodnoty lití včetně průběhu tuhnutí a chladnutí lze zařadit experiment č. 1, 8 a 9. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, určité nepřesnosti v simulačním výpočtu se objevují. Příkladem může být v okamžiku lití, kdy nasimulovaný průběh vykazuje přímý (kolmý) nárůst teploty než je tomu u příslušného experimentů. To je způsobeno dvěma faktory, u experimentu je to dáno rychlostí plnění formy a u simulací je to ovlivněno definicí počáteční teploty lití, která je po dobu plnění konstantní i přes veškerou snahu ovlivnit to různým nastavením programu. Dalším příkladem může být nasimulované průběhy v okamžiku chladnutí odlitku, který má strmější pokles teploty než odpovídá příslušným experimentům. Simulační výpočet průběhu teplot na líci formy nebylo možné přiblížit danému experimentu. Důvodem byl nedostatek na straně využívaného programu, který nebyl schopen počítat odlehnutí odlitku od formy. Právě u experimentů s čistým hliníkem je dobře vidět patrné odlehnutí formy. Výraznou odchylkou hodnot se značí

simulace teplot ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy, kdy teploty experimentu jsou vyšší a s delším náběhem do maxima. Naopak hodnoty naměřených a nasimulovaných křivek se ve vzdálenějších místech od líce formy více blíží časové a teplotní shodě.

Experimenty se ukázaly silně náchylné na správné a hlavně na shodné dodržení jednotlivých faktory (podmínek) experimentu. Jako např. teplota lití, teplota formy, teplota okolí, teplota dutiny, rychlost odlévání. Všechny tyto skutečnosti mají vliv i na samotné simulační výpočty. Právě proto ze získaných výsledných hodnot vyplývají některé skutečnosti, jako např.:

- a) je-li v čase t_0 teplota formy nízká, pak se shodnými podmínkami experimentů probíhá tuhnutí odlitků stejného objemu kratší dobu. Zároveň je ochlazující účinek u odlitku intenzivněji než ve formě předeřáté na vyšší teplotu v čase t_0 .
- b) je-li v čase t_0 teplota formy vyšší, pak je čas nutný k dosažení maximální teploty v daných místech formy delší.
- c) je-li nedostatečné vedení tepla formou, pak v důsledku toho formou prochází malé množství tepla (důsledek tepelných vlastností formy), tím nedochází k velkým teplotním gradientům ve formě, jak je patrné ze simulací č. 3, 5, 10.

5.6 Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků tělesa volantů

Pro potřebu odzkoušení a použití metodiky, byly provedeny výpočty tuhnutí a chladnutí odlitku tělesa volantu. Pro simulační výpočty byl opět použit simulační program QuikCAST. Tyto výpočty byly provedeny pro různé podmínky plnění slévárenské formy taveninou ze slitiny hořčíku EN-MB 21 220 (EN MB MgAl5Mn), kde teplota lití byla 660 °C.

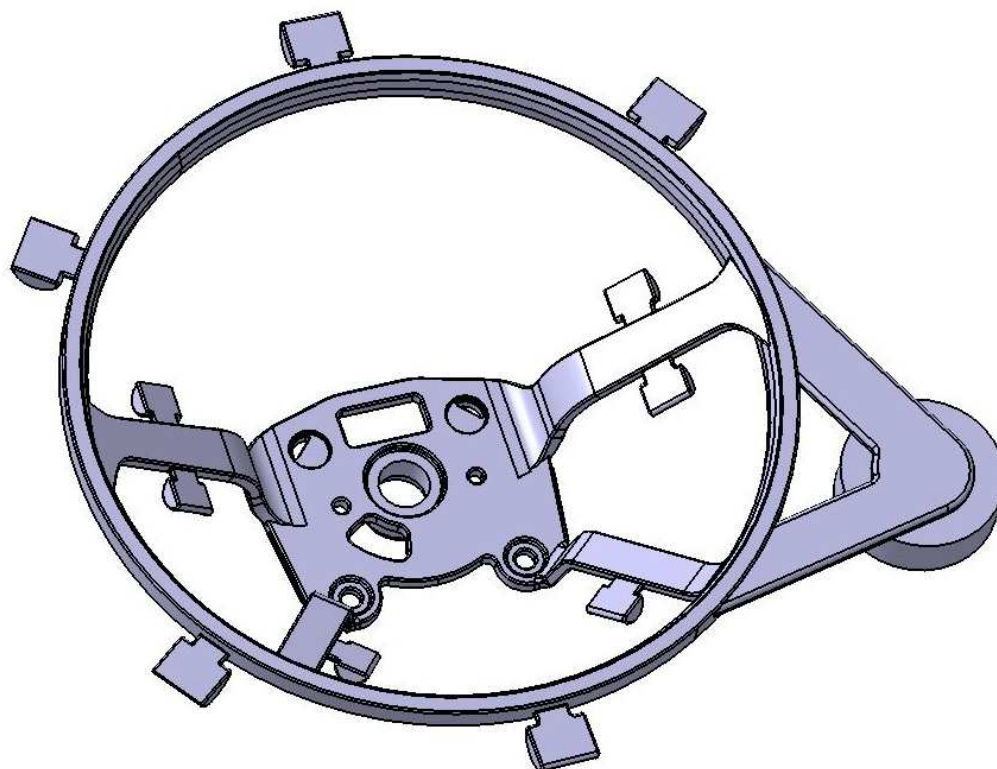
Charakteristické hodnoty fyzikálních veličin pro slitinu hořčíku MgAl5Mn jsou uvedeny v tabulce 5.3. Pro tepelné výpočty jsou však důležité teplotní závislosti fyzikálních veličin.

	Slitina MgAl5Mn
Teplota Likvidu [°C]	625
Teplota Solidu [°C]	546
Měrná tepelná kapacita [J/kg.K]	1022
Latentní krytalizační teplo [J/kg]	370 000

Tab. 5.3 Charakteristické hodnoty fyzikálních veličin pro slitinu hořčíku MgAl5Mn

Pro potřebu analýz byly vybrány nejvíce odpovídající možnosti predikce procesu tuhnutí a chladnutí odlitků. Vysokotlaká forma byla vyrobena z oceli ČSN 19552 (1.2343, dle DIN EN ISO 4957 X 38CrMoV5.1). Tepelně fyzikální hodnoty materiálu odlitku a formy byly použity z databanky simulačního programu (popřípadě byly doplněny či upraveny).

Na základě několika iterací bylo provedeno několik technologických změn na výpočtovém modelu volantu. Kupříkladu umístění a velikost nálitků, pro potřeby tlakového lití velikost vtokové tablety (množství nataveného materiálu), velikost zářezů (vliv na rychlost plnění) a s velikostí vtokové soustavy i použitý tlak, potřebný k plnění dutiny formy viz **obrázek 4.4.9**. Z toho vyplývá, že za pomoci těchto simulačních výpočtů lze odladit konstrukci odlitku (vtoková soustava, nálitky), tak aby bylo dosaženo potřebné kvality.

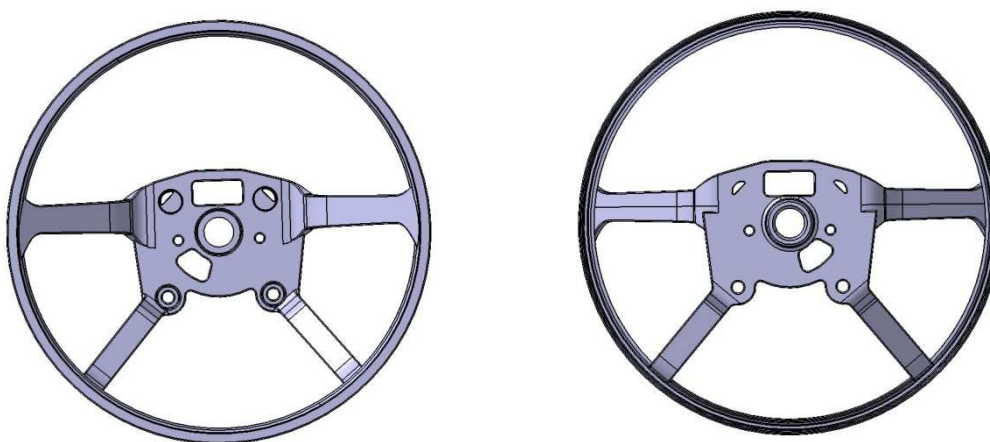


Obr. 4.4.9 Model odlitku tělesa volantu s vtokovou soustavou

Při simulačních výpočtech bylo sledováno naplnění slévárenské formy taveninou a rozložení teplot v průběhu tuhnutí a chladnutí odlitku. Na **obr. 4.5.3** jsou ukázky výsledků simulačních výpočtů. Na **obr. 4.5.3 a)** je simulace počátku plnění slévárenské formy. Na **obr. 4.5.3 b)** je ukázka průběhu plnění slévárenské formy v časovém okamžiku 0,0086 s. Na **obr. 4.5.3 c)** je okamžik naplnění dutiny slévárenské formy taveninou. **Obr. 4.5.3 c)** ukazuje naplnění dutiny slévárenské formy v čase 0,0145 s. Obr. 4d) znázorňuje rozložení teplotních polí po naplnění dutiny formy taveninou a první okamžiky tuhnutí odlitku v čase 0,468 [s]. V levé části obrázku je barevná stupnice teplot. Současně je zde označena teplota likvidu 625 °C a teplota solidu

546 °C. Této barevné stupnici teplot odpovídají různá místa tuhnutí volantu. Na **obr. 4.5.3 d)** je rozložení teplot v odlitku v okamžiku 0,941 [s]. V některých místech v levé části odlitku již proběhlo tuhnutí. Ostatní části odlitku se blíží teplotě solidu 546 °C. Nejvyšší teplota je v naříznutí a ve vtokové tabletě. Tato teplota je vyšší než teplota likvidu 625 °C. Na **obr. 4.5.3 e)** je rozložení teplot v okamžiku 1,728 [s]. V obvodové části odlitku, které jsou při líci formy, odpovídají ztuhnutí odlitku. Ve vnitřní části odlitku probíhá tuhnutí. Také tuhnutí probíhá v příčných spojovacích elementech. Teploty ve vtokové soustavě, v naříznutí a vtokové tabletě se nachází mezi teplotou solidu a likvidu. Na **obr. 4.5.3 f)** je rozložení teplot v okamžiku 2,275 [s], tyto teploty naznačují ztuhnutí dalších partií

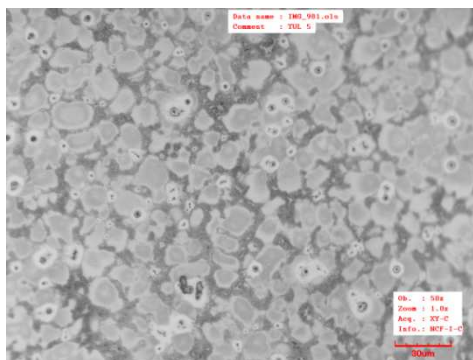
odlitku. Ve střední části probíhá tuhnutí odlitku. Teploty v obvodové části odlitku se nachází pod teplotou solidu. Teploty v naříznutí a vtokové tabletě se nachází mezi teplotou solidu a likvidu. Na **obr. 4.5.3 f**) je rozložení teplot v 3,341 [s]. Teploty v obvodové levé části odlitku jsou pod teplotou solidu 546 °C, některé části mají již teplotu 350 °C. Také teploty v levé části odlitku, tj. oblast příčných spojnic se blíží teplotě 350 °C. Ve střední části odlitku je dokončováno nebo ještě probíhá tuhnutí. Ve vtokové soustavě, v naříznutí a vtokové tabletě je dokončováno tuhnutí. Na **obr. 4.5.3 g**) je rozložení teplot v 7,50 [s]. Z obrázku je zřejmé homogenní teplotní pole odlitku, jehož teplota je 350 °C.



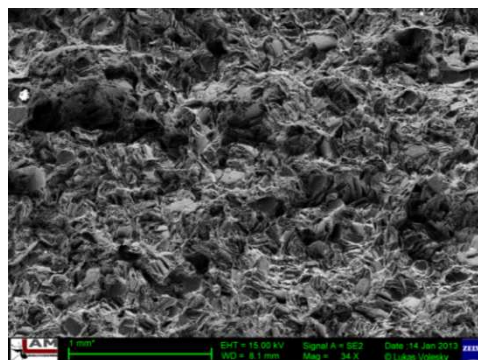
Obr. 4.5.0 Model odlitku tělesa volantu ze slitiny hořčíku



Obr. 4.5.1 Reálný odlitek tělesa volantu ze slitiny hořčíku

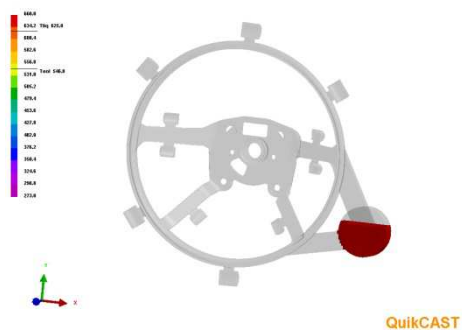


a)

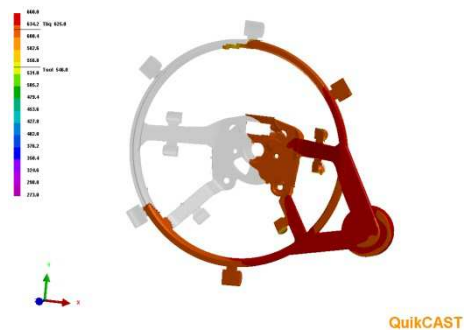


b)

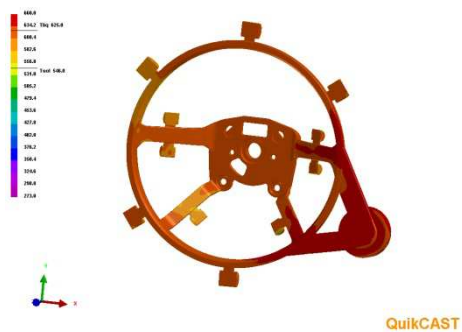
Obr. 4.5.2 Struktura slitiny MgAl5Mn (a – sledováno na laserovém konfokálním mikroskopu, b - struktura lomové plochy MgAl5Mn - SEM)



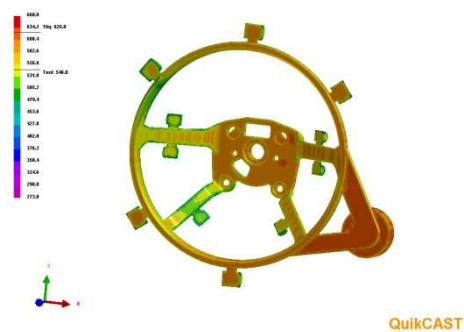
a)



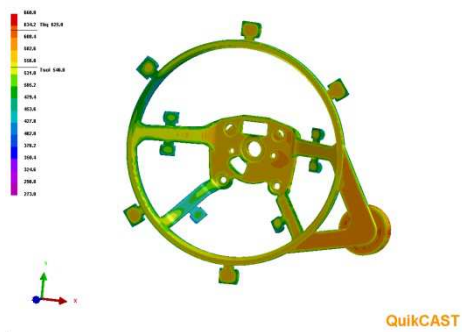
b)



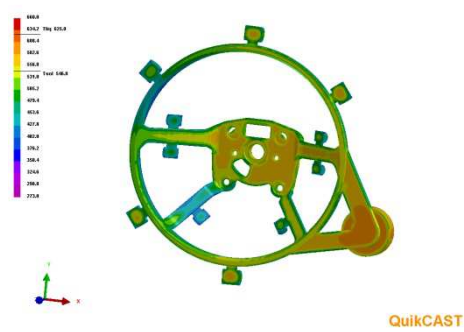
c)



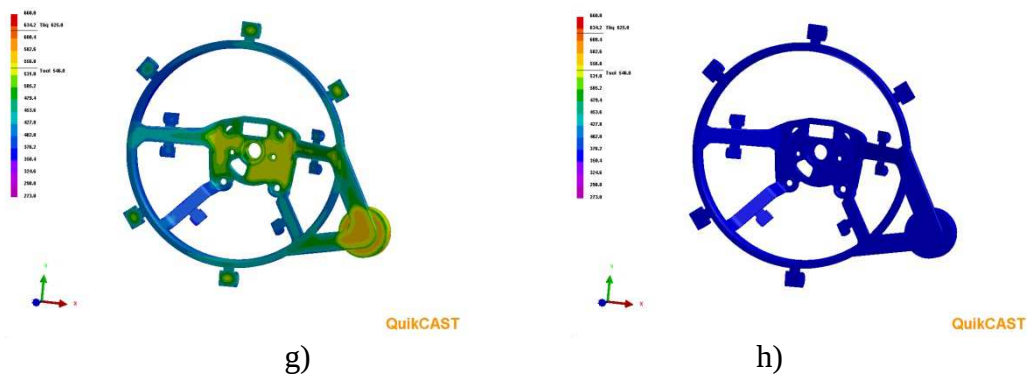
d)



e)



f)



Obr. 4.5.3 Teplotní pole odlitku v okamžiku jeho tuhnutí a chladnutí

Slitina	Chemické složení podle ASTM							
	[hmot. %]							
	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Ost.
AZ 91	8,3-9,7	0,15-0,5	0,35-1,0	0,10	0,03	0,002	0,005	0,02
AM60	5,5-6,5	0,24- 0,6	0,22	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AM50	4,4-5,4	0,26-0,6	0,22	0,10	0,01	0,002	0,004	0,02
AM20	1,6-2,6	Min.0,1	0,20	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02

Tab. 5.4 Chemické složení slitin hořčíku pro tlakové lití

Vlastnosti	Slitina označená podle ASTM			
	AM20	AM50	AM60	AZ 91
Mez pevnosti				
Rm [MPa]	150 až 210	180 až 230	190 až 250	200 až 260
Mez kluzu				
Rp0,2 [MPa]	80 až 100	110 až 130	120 až 150	140 až 170
Tažnost [%]	8 až 18	5 až 15	4 až 14	1 až 6
Nárazová práce [J]	19	18	17	6
Tvrdost	40 až 55	50 až 65	55 až 70	65 až 85

Tab. 5.5 Mechanické vlastnosti vybraných slitin hořčíku

Poznámka: Z výše uvedených je zřejmé, že uvažované slitiny hliníku pro výrobu volantů musí vykazovat vyšší tažnost cca 15 % a pevnost v tahu cca 200 až 230 MPa.

Fáze	Elementy [at. %]			
	Mg	Al	Mn	Si
α Mg	95,80	4,20	-	-
Mg ₁₇ Al ₁₂	64,88	34,59	-	0,53
Mn ₅ Al ₈	24,75	46,25	28,28	0,71

Tab. 5.6 Chemické složení identifikovaných intermediálních fází obsažených ve slitině AM 50 (MgAl5Mn) [17]

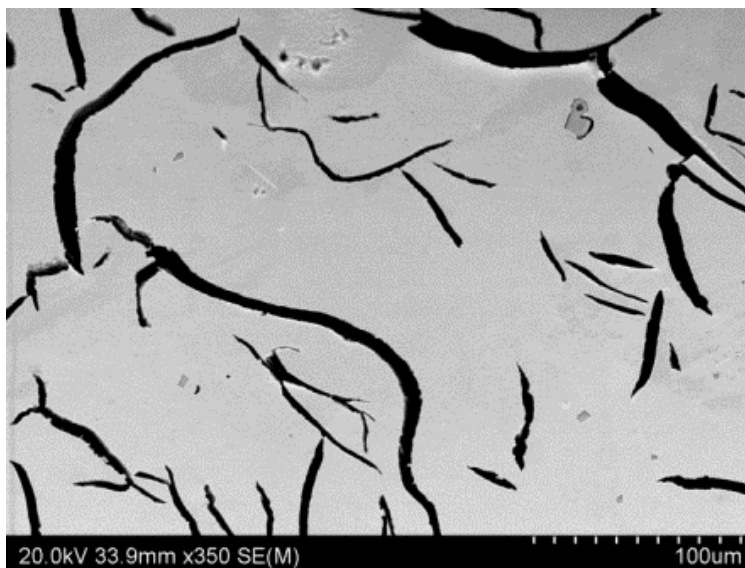
Slitina	Chemické složení podle EN [hmot. %]							
	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
MgAl5Mn	6,4	0,59	0,20	0,10	0,02	0,002	0,005	zbytek

Tab. 5.7 Chemické složení slitiny použité k výrobě volantů

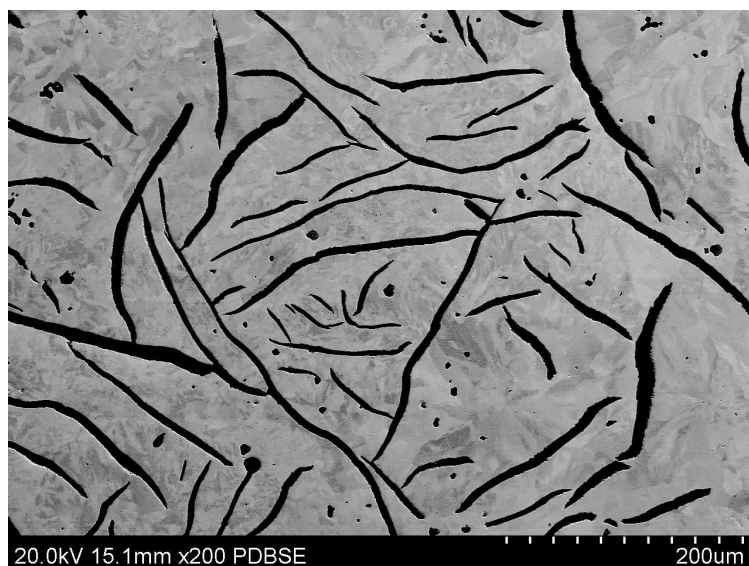
6 Simulační výpočty predikce chování grafitických litin

Na základě odborných výsledků získaných v rámci spolupráce s universitou ve Švédsku, je tato kapitola zaměřena na tvorbu výpočtového simulačního modelu struktury grafitické litiny. Současně byly provedeny simulační výpočty predikce chování litiny s lupínkovým grafitem při zatěžování vnější silou. Tato litina je důležitým konstrukčním materiálem pro výrobu dílů v automobilovém průmyslu (bloky a válce spalovacích motorů, brzdové kotouče a bubny, pístní kroužky, atd.).

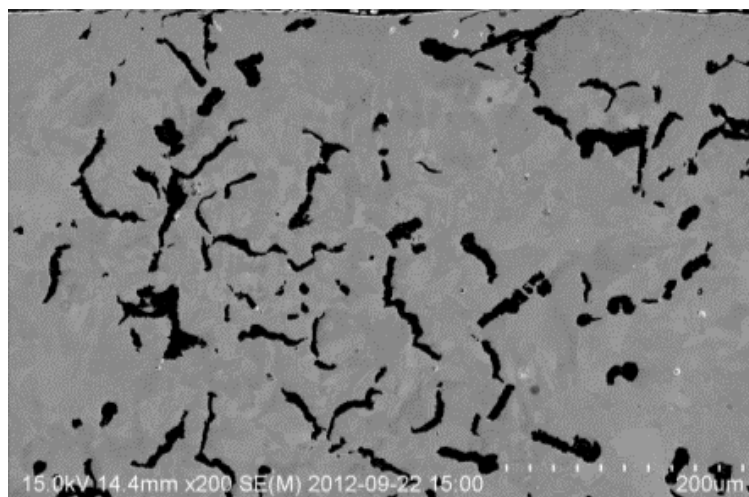
Základní myšlenka pro predikci chování litiny s lupínkovým grafitem při zatížení vnější silou je předpoklad, že vazby mezi matricí a grafitem jsou pevné nebo dochází ke tření mezi těmito dvěma strukturními součástmi (grafitem a matricí). Na základě těchto předpokladů bylo přistoupeno k sestavení simulačního modelu. Tento výpočtový model je založen na numerické metodě konečných prvků (FEM). Modely vychází z mikrostruktury litiny s lupínkovým grafitem a z mikrostruktury litiny s červíkovým grafitem. K tomuto účelu byly použity tři typy mikrostruktury litiny a to z důvodu toho, aby mohly být do modelu zahrnuty vlivy velikosti a rozložení grafitu, viz **obr. 5.1**, **obr. 5.2** a **obr. 5.3**.



Obr. 5.1 Velikost a rozložení grafitu ve formě lupínků ve struktuře litiny - Vzorek 1



Obr. 5.2 Velikost a rozložení grafitu ve formě lupínků ve struktuře litiny - Vzorek 2



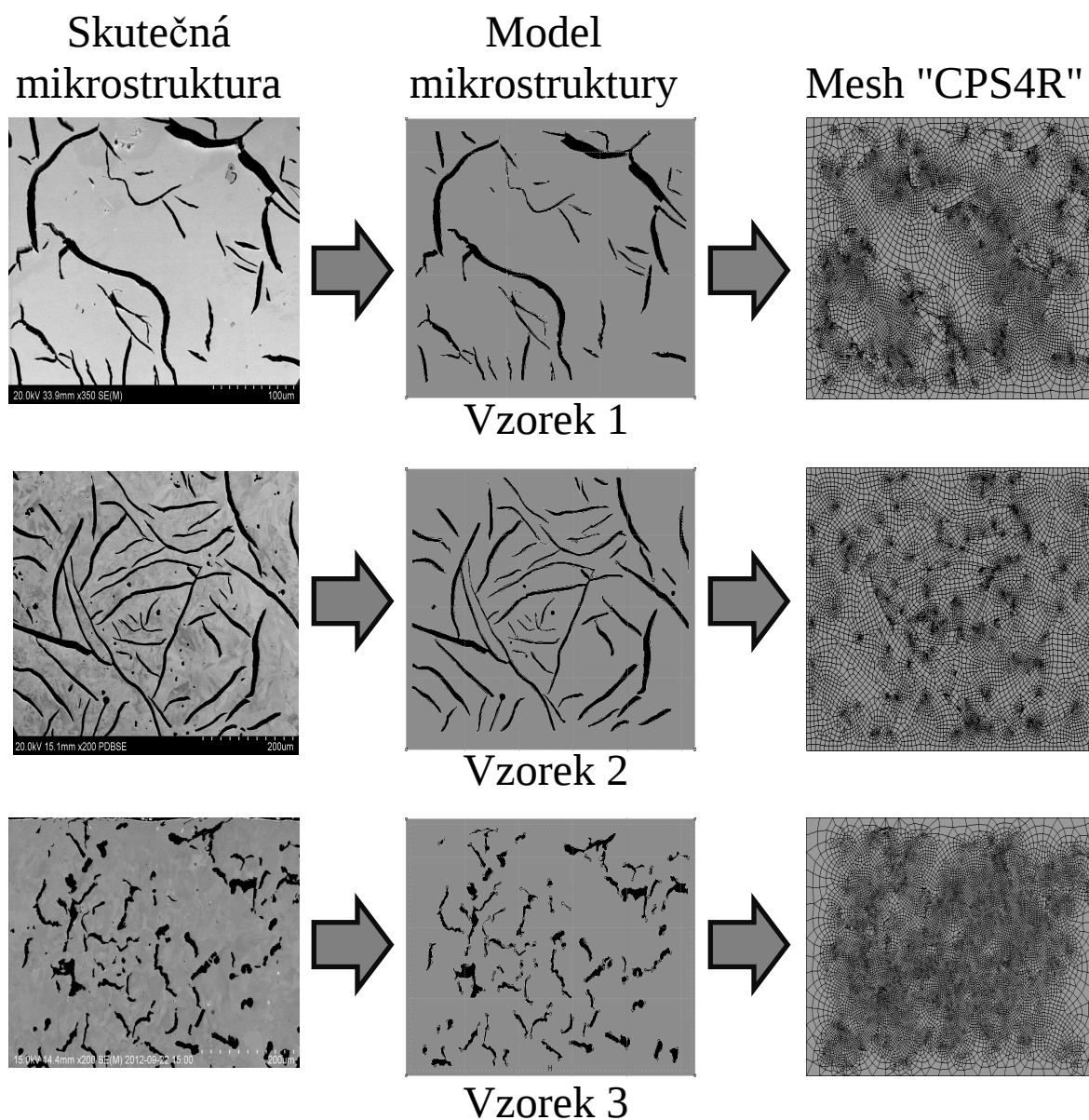
Obr. 5.3 Velikost a rozložení grafitu ve formě červíků ve struktuře litiny - Vzorek 3

6.1 Pre processing

Tato část se zaměřuje na tvorbu modelu a jeho nastavení pro simulační výpočty. Pro sestavení výpočtového modelu bylo nutné vytvořit dva dílčí grafické modely mikrostruktury (skica mikrostruktury) a to jak pro grafit, tak také pro základní kovovou hmotu (matrice). Pro tvorbu obou těchto grafických modelů, byl použit hojně využívaný komerční program CATIA. Tyto dílčí grafické modely (skici) byly dále importovány do programu Abaqus/CAE, tak aby bylo možné provést všechny tři fáze CAE (částečný pre-procesing, procesing a post-procesing). To znamená, že se zmíněný komerční program použil nejen pro sestavení výpočtového modelu a simulace zatížení struktury vnějšími silami, ale i k vyhotovení závěrečného vyhodnocení výsledků. Komerční program Abaqus/CAE pracuje na základě metody konečných prvků, což

je znázorněno na **obr. 5.4** ve sloupci označeném jako "Mesh CPS4R" nebo na obrázcích 5.7, 5.9 a 6.1. Zároveň byly vybrány a provedeny simulace s cílem porovnat výsledky dvou typů simulací a to lineární a nelineární stav materiálu.

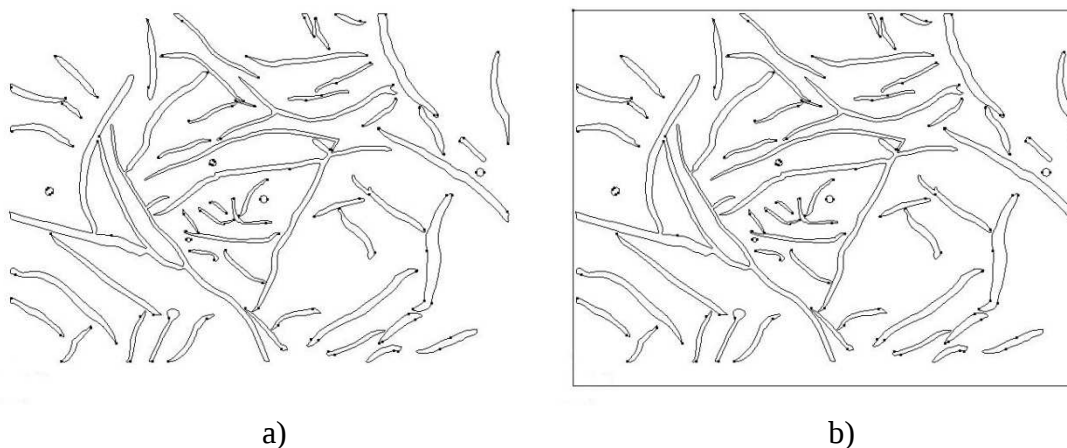
6.1.1 Vytvoření výpočtového modelu



Obr. 5.4 Jednotlivé kroky při tvorbě výpočtového modelu

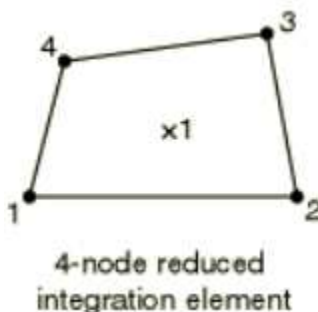
Jak je patrné z **obr. 5.4**, tvorba výpočtového modelu má tři základní kroky a to tvorba grafického modelu (skici) z reálného vzorku mikrostruktury, dále pak tvorba shellu nebo solidu (záleží jaká metoda simulace je zvolena) a nakonec tvorba meshe.

Tvorba grafického modelu (skica) vycházela ze skutečné mikrostruktury, která se skládá ze dvou základních částí. Část první je grafit (**obr. 5.5 a)**) a část druhá je matrice (**obr. 5.5 b)**), proto byl grafický model vytvořen ze dvou na sobě nezávislých částí. Jelikož tvar, velikost a směr grafitu v mikrostruktuře je náhodný, byl zvolen jednoduchý 2D model na místo 3D.

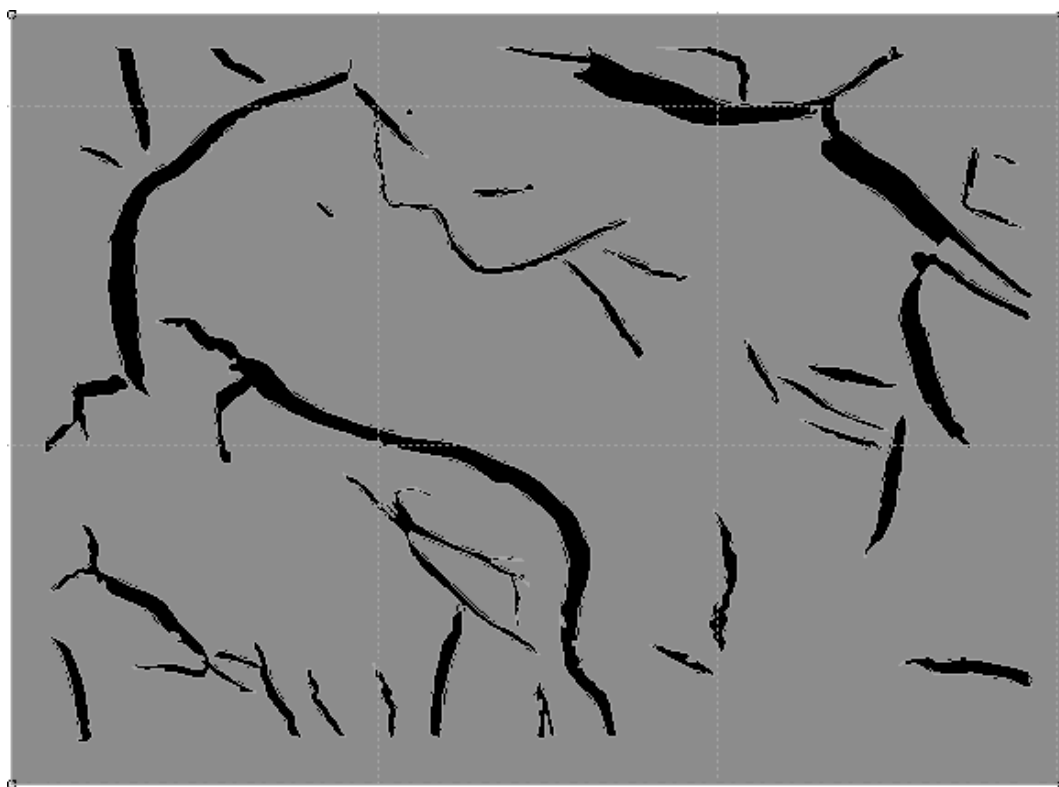


Obr. 5.5 Grafický model (skica) vycházející ze skutečné mikrostruktury - vzorek 2

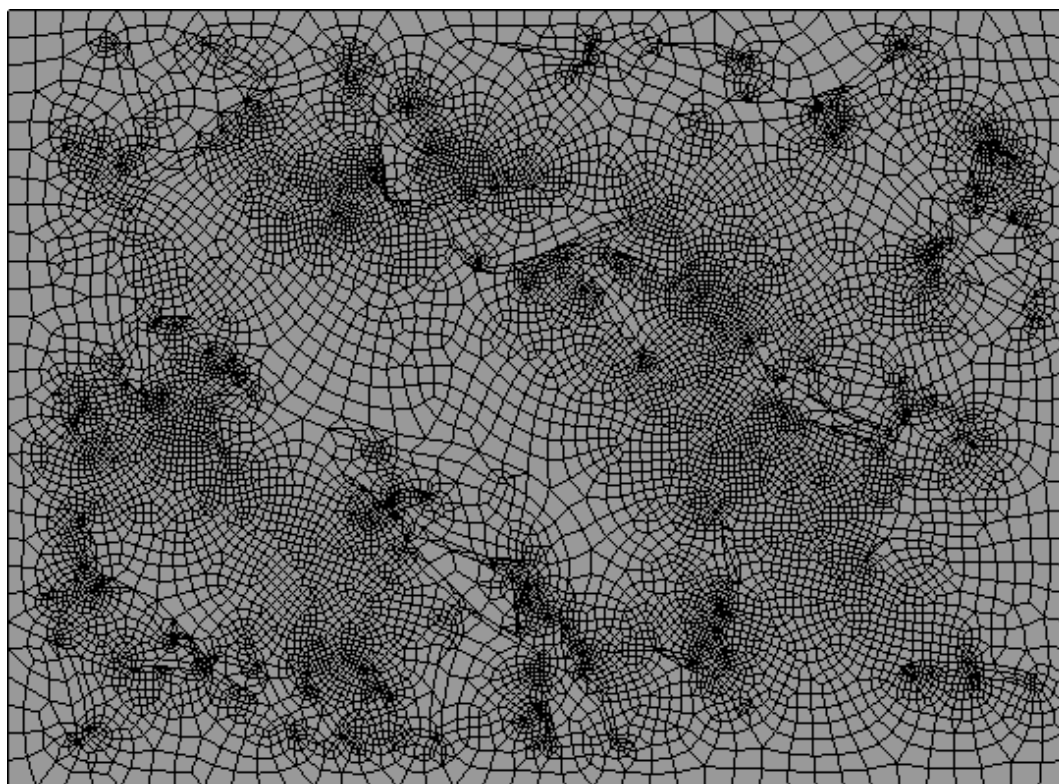
Pomocí funkce „Shell“ byl vytvořen plochý výpočtový model, kterému byla poté přiřazena velikost tloušťky (1mm fiktivní tloušťka). Tato tloušťka v našem případě představuje třetí rozměr a to z důvodu toho, že program Abaqus/CEA pro své simulační výpočty vyžaduje informace o všech rozměrech modelu. Dalším důležitým krokem při vytváření výpočtového modelu je vytvoření meshe pro matrici a grafit (viz **obr. 5.7, 5.9, 6.1**), která bude představovat výpočtový model. Pro model byl zvolen tvar a metoda tvorby meshe CPS4R (A 4-node bilinear plane stress quadrilateral, reduced integration, hourglass control.) elementy jsou tvořeny čtyřmi body v bilineární napětíové rovině, redukováná integrace v závislosti na čase (počet stupňů volnosti 1,2).



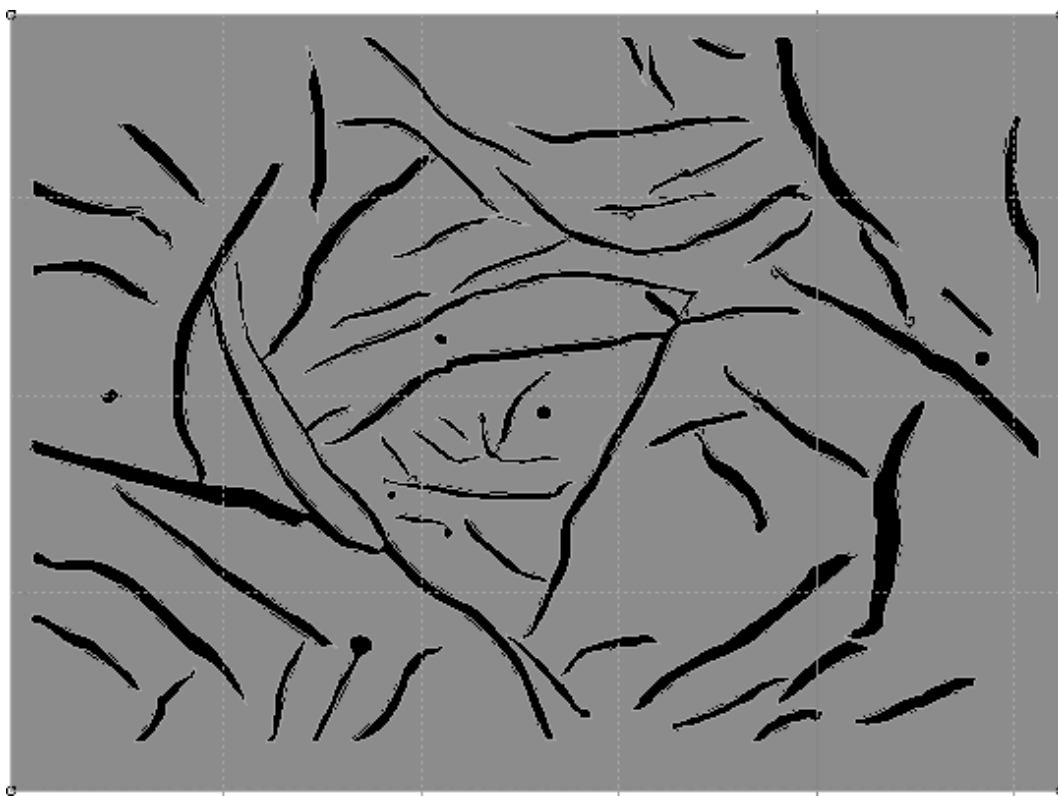
Obr.: Zdroj: <http://www2.mae.ufl.edu/haftka/finite-element/ABAQUS-elements.pdf>



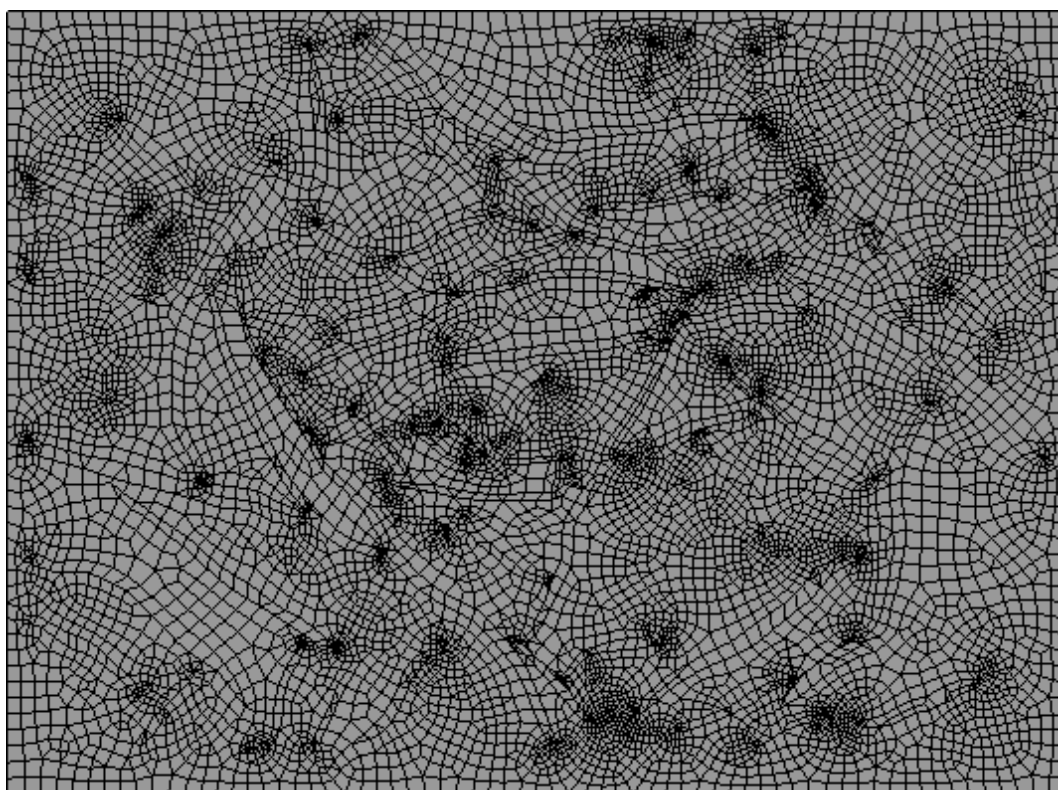
Obr. 5.6 Grafický model vycházející ze skutečné mikrostruktury - vzorek 1 (2300strain_q004)



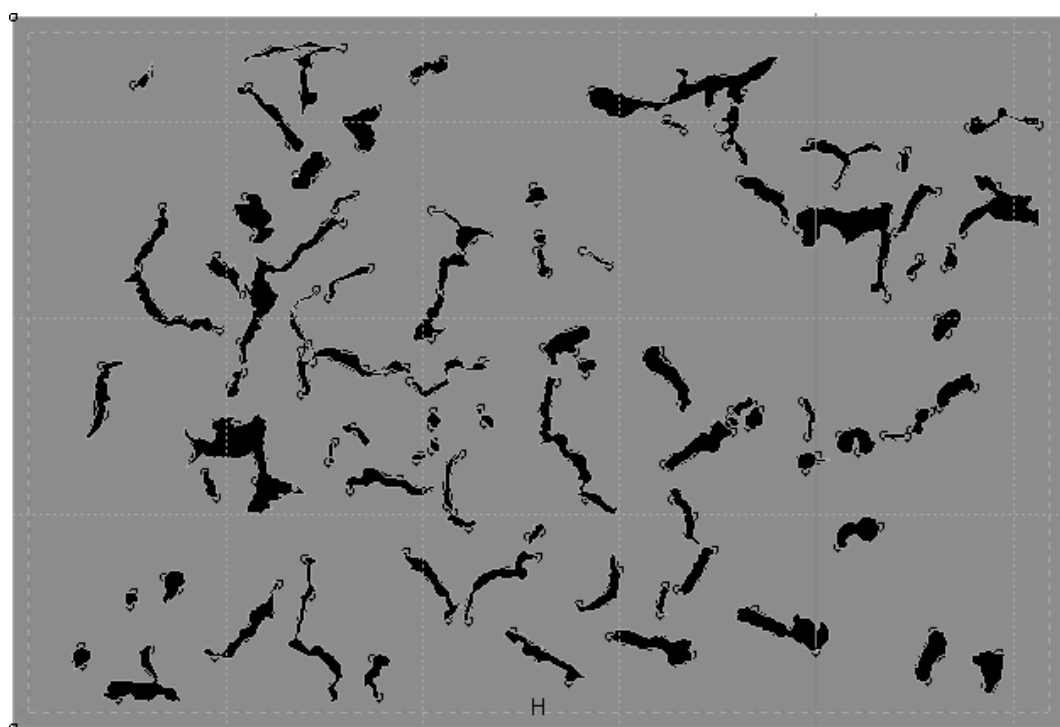
Obr. 5.7 Příklad vytvoření Meshe pro model mikrostruktury - vzorek 1 (2300strain_q004)



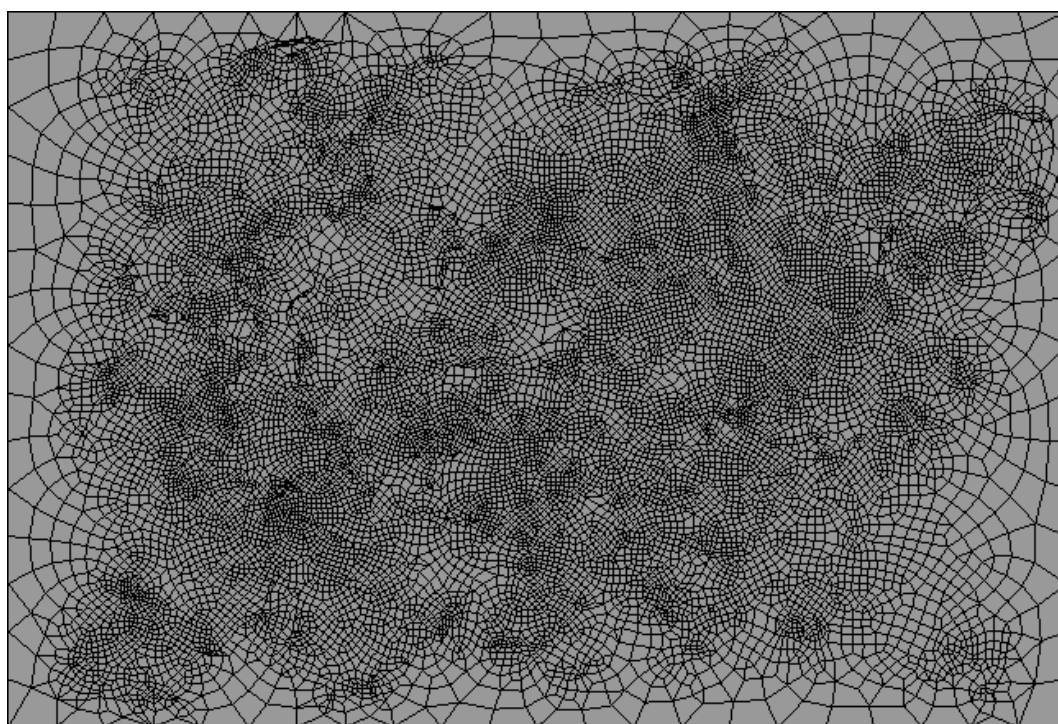
Obr. 5.8 Grafický model vycházející ze skutečné mikrostruktury - vzorek 2 (MicroS)



Obr. 5.9 Příklad vytvoření Meshe pro model mikrostruktury - vzorek 2 (MicroS)



Obr. 6.0 Grafický model vycházející ze skutečné mikrostruktury - vzorek 3 (CG4983_q002)



Obr. 6.1 Příklad vytvoření Meshe pro model mikrostruktury - vzorek 3 (CG4983_q002)

6.1.2 Materiálové vlastnosti

Pro simulační výpočty jsou důležité plastické vlastnosti materiálu, které lze stanovit poměrně složitým měřením. Data byla převzata z provedeného experimentu tah a tlak. Tato data však popisují materiálové vlastnosti celé mikrostruktury (to odpovídá matici i grafitu současně). To znamená, že hodnota plasticity se týká sledované litiny a ne zvlášť hodnoty plasticity grafitu a hodnoty plasticity matrice. Materiálové vlastnosti pro elasticitu, byly převzaty z materiálové databáze CES EduPack. Použité hodnoty k simulačnímu výpočtu pro grafit a matici jsou uvedeny v tabulce 5.8.

Tabulka 5.7 Zjištěné hodnoty pro grafit a matici litiny s lupínkovým grafitem (ČSN EN GJL 250). Hodnoty obsažené v tabulce byly stanoveny z naměřených deformačních křivek obr. 6.3, 6.4 a na základě prací [44], [45].

			Materiálové vlastnosti			
			Lineární simulace		Nelineární simulace	
"Vzorek 1" "Vzorek 2" "Vzorek 3"	Grafit		Youngův modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo μ [1]	Youngův modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo μ [1]
		Elasticita	12000	0,2225	12000	0,2225
	Matrice	Elasticita	206000	0,29	206000	0,29
		Plasticita	Mez kluzu [MPa]	Plastická deformace	Mez kluzu [MPa]	Plastická deformace
			-	-	25,38	0
			-	-	49,77	0,0002338
			-	-	85,97	0,0003919
			-	-	99,51	0,0004676
			-	-	156,1	0,0008981
			-	-	199,6	0,001371
			-	-	281,2	0,003117
			-	-	325,5	0,005332

Tab. 5.8 Materiálové vlastnosti pro matici a grafit.

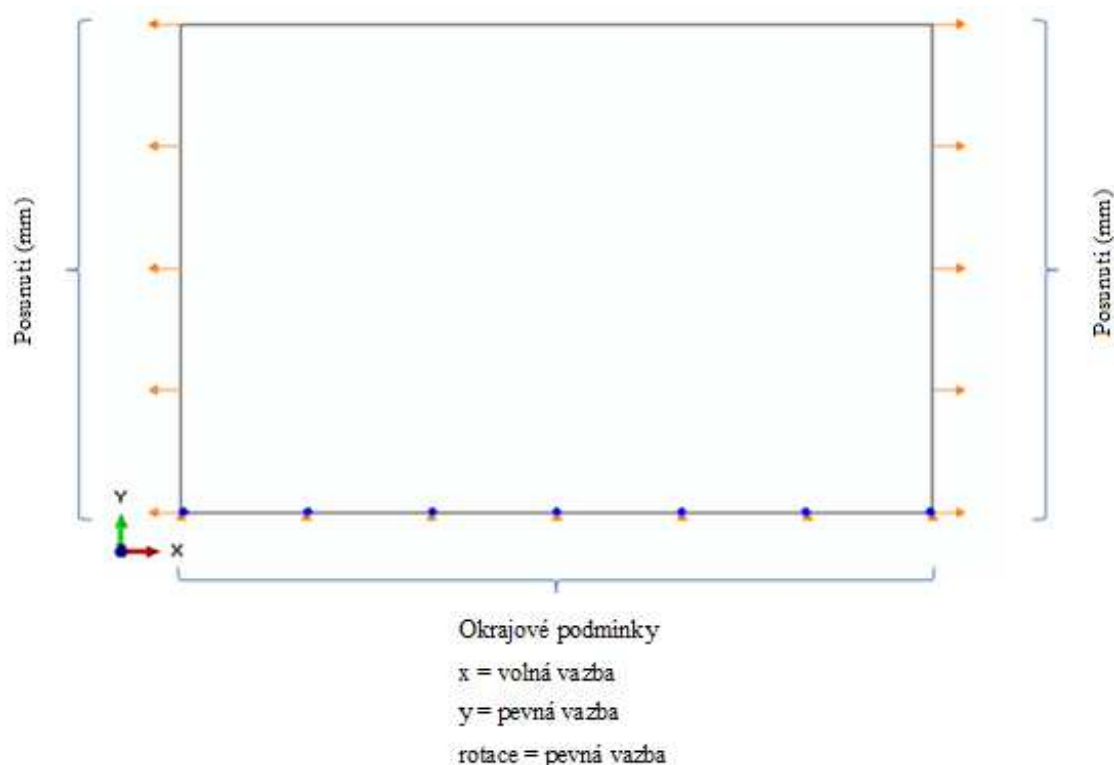
Pro další krok nastavení simulačního výpočtu zatěžované mikrostruktury litiny je nutné definovat okrajové podmínky, což znamená typ a umístění vazeb a zároveň zatížení na výpočtovém modelu.

6.1.3 Popis okrajových podmínek pro model mikrostruktury litiny

Vazby

Pro okrajové podmínky byla zvolena jednoduchá varianta zavazbení. Tato varianta je schematicky vyobrazena na **obr. 6.2**. Veškeré simulace byly vyhotoveny s okrajovými podmínkami, jak je zřejmé z **obr. 6.2**. Jak je vidět na spodní hraně je fixace v ose y a zafixována je i rotace. V ose x je volné uložení a to proto, že zatížení je z obou stran symetrické tím nedochází k žádnému posunu modelu v ose x (pouze se model natahuje).

Dalším důležitou veličinou pro okrajové podmínky je zatížení. Zatížení je provedeno ve formě posunutí Δl . Simulace byla provedena sedmkrát a každá z nich odpovídá jednomu zatížení (-, F1 až F6). Jednotlivé hodnoty posunutí jsou pak zvoleny na základě naměřené deformační křivky (Stress-strain křivka), která je na **obr. 6.3** a na základě výrazů obsažených v kap. 4.5.1.3 (str. 59). Velikosti zatížení a jejich rozdíly jsou patrné z tabulky 5.8. Na **obr. 6.2** jsou schematicky zobrazeny vazby a zatížení modelu mikrostruktury litiny.



Obr. 6.2 Okrajové podmínky pro simulace.

Pro okrajové podmínky byla zvolena jednoduchá varianta upevnění. Tyto okrajové podmínky jsou schematicky vyobrazeny na **obr. 6.2**. Ty však nebyly jediné, které byly použity při simulačních výpočtech. Další podobná varianta byla použita při zkušebních simulačních výpočtech, kde zatížení bylo produkováno pomocí tlaku. Rozdíl této varianty okrajových podmínek a varianty viz **obr. 6.2** je pouze v nahrazení stávajících vazeb za vazbu, která fixuje bod umístěný uprostřed dolní hrany. Varianta okrajových podmínek s fixačním bodem uprostřed byla využita pro zkušební simulační výpočty a na základě výsledků nebylo v těchto simulacích pokračováno.

Většina simulací byla vyhotovena s okrajovými podmínkami, jak je patrné z **obr 6.2**. Vazby jsou na spodní hraně, fixace v ose x a fixace rotace. V ose y je vazba volná a to z důvodu symetrie zatížení.

6.1.4 Vazby mezi grafitem a matricí

Toto je jedna z nejdůležitějších částí nastavení modelu pro simulaci. V reálu může při cyklické deformaci litin docházet na rozhraní mezi grafitem a matricí k otevírání a zavírání mezer. To způsobí, různou odezvu v tahu a v tlaku: v tlaku, materiál matrice tlačí na grafit, který se podílí na únosnosti. V tahu, rozhraní se otevírá a grafitové inkluze příliš nepřispívají k celkové únosnosti celé hmoty. Pro modelování tohoto chování, jsou matricové a grafitové částice (nebo struktury) modelovány jako jednotlivé kontaktní tělesa viz **obr. 5.5**. Vzhledem k tomu, že další informace o rozhraní mezi grafitem a matricí nejsou zcela známy, bylo rozhodnuto použít různé druhy nastavení pro chování, které probíhá mezi matricí a grafitem. Byly zvolené tři metody, které jsou znázorněny ve schématu 1 pod označením „Typ interakce“.

První rozhraní (Dutiny) je simulace čistě s matricí bez grafitu. Pomocí tohoto simulačního výpočtu je snaha určit účinek grafitových částic v litině s lupínkovým grafitem. Druhé rozhraní (Vázaný kontakt) je simulace s použitím pevného kontaktu mezi grafitem a matricí (pevné spojení grafitu a matrice). Třetí rozhraní (Vzájemně působící kontakt) je modelováno jako volný kontakt s tangenciálními vlastnostmi (Frictionless = nízké nebo žádné tření) a normálovými vlastnostmi (Pressure-Overclosure je jako pevný kontakt, aniž by docházelo k separaci po kontaktu). Důvodem proč bylo zavedeno třetí rozhraní je proto, že v litinách, může dojít při zatížení k deformaci a k otevření mezery mezi grafitem a matricí. Po odlehčení

se tato mezera opět uzavře. Předpokladem je, že otevírání a zavírání tvořících se mezer je hlavní příčinou rozdílného chování materiálu vyskytujícím se v jednoosém tahu a tlaku.

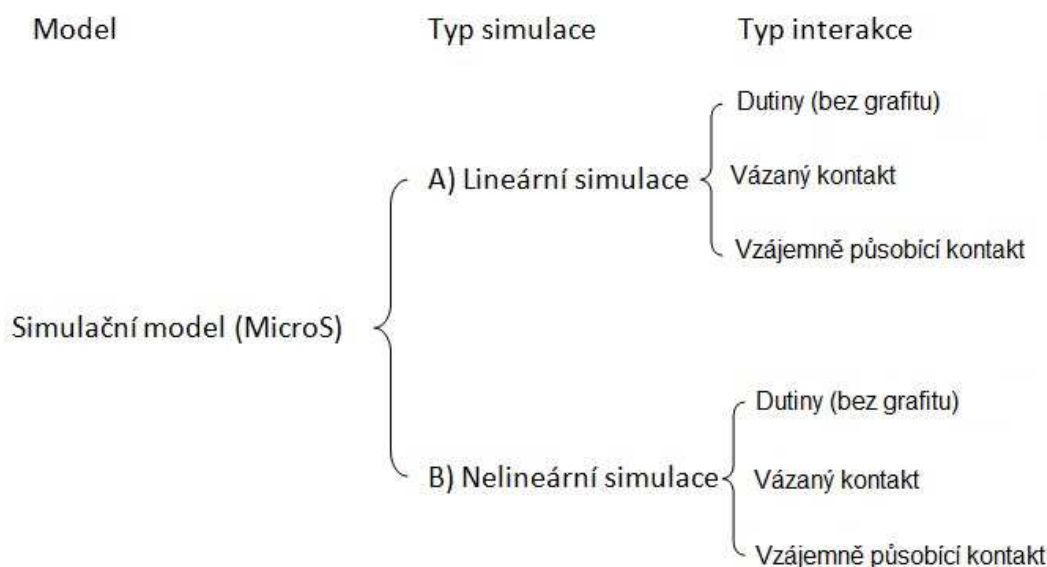


Schéma 1: Strom popisující veškeré provedené simulace.

U varianty „Vzájemně působící kontakt“ bylo provedeno mnoho simulací s různými druhy nastavení. Přesto výsledky ze simulací odpovídali nejvíce nastavení „Vázaný kontakt“ popsaném v předešlém odstavci.

6.1.5 Zatížení (Síly)

Zatížení modelu bylo zvoleno na základě maximálního napětí a liší se pro jednotlivé modely. První simulace proběhly se stejným posunutím, poté byly změněny na deformaci (Strain). Jelikož se každý model liší v počtu a tvaru grafitu byla zvolena pro každý model jiná zatížení. Velikosti zatížení a jejich rozdíly jsou patrné z tabulek 5.9 až 6.3, které obsahují jak zatížení posunutím, tak údaje pro zatížení tlakem o kterém je psáno v předešlém odstavci 6.1.3. Jednotlivé hodnoty posunutí jsou zvoleny na základě naměřených deformačních křivek (Stress-strain křivek), které jsou na obrázcích 6.3 a 6.4 a na základě deformační křivky obr. 6.5 a výrazů obsažených v kap. 4.5.1.3 (str. 59).

Posunutí

2300strain_q004			
	Δl	Strain	l
-	0,00005	0,00014	0,363
F1	0,00055	0,00152	
F2	0,00109	0,003	
F3	0,00200	0,0055	
F4	0,00254	0,007	

MicroS			
	Δl	Strain	l
-	0,00009	0,00014	0,636
F1	0,00097	0,00152	
F2	0,00191	0,003	
F3	0,002	0,00315	
F4	0,003	0,0047	
F5	0,00350	0,0055	
F6	0,00445	0,007	

CG4983_q002			
	Δl	Strain	l
-	0,00006	0,0001	0,636
F1	0,00019	0,0003	
F2	0,00032	0,0005	
F3	0,00045	0,0007	
F4	0,00070	0,0011	
F5	0,00083	0,0013	
F6	0,00092	0,00145	

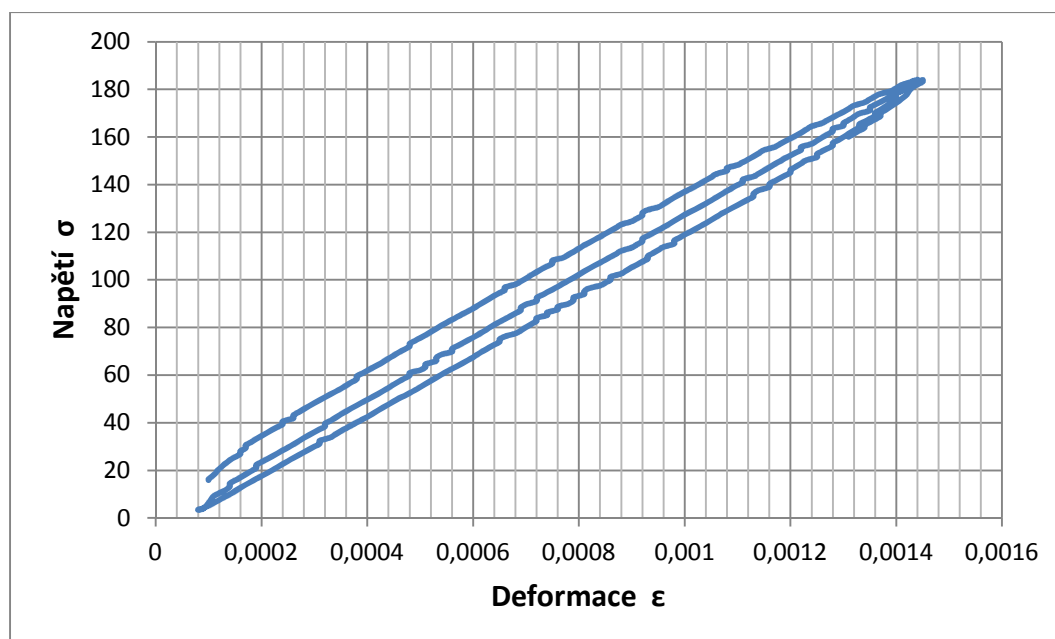
Tab. 5.9-6.1 Hodnoty posunutí jako zatížení.

Tlak (Tah)

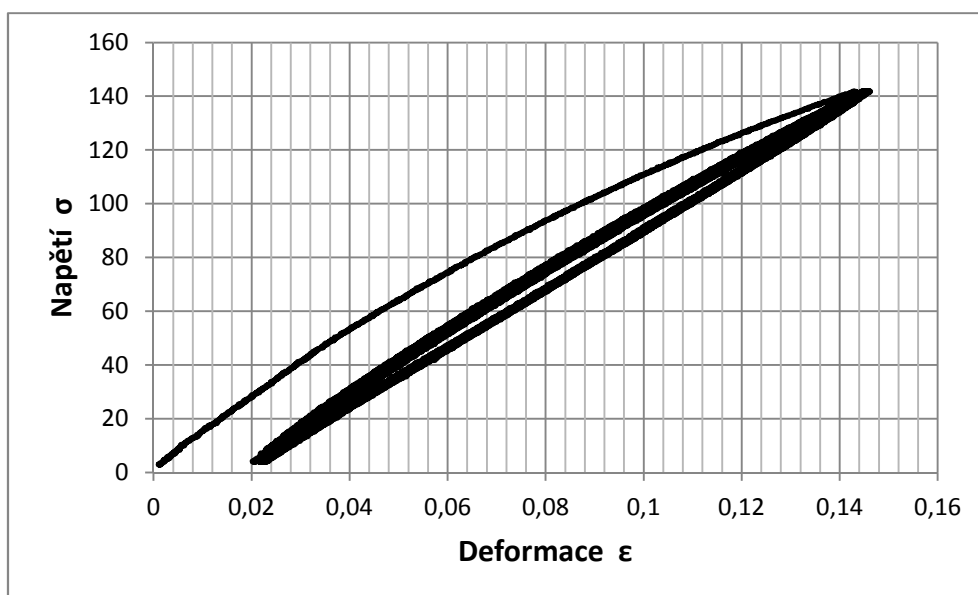
MicroS		
	%	Pressure=Stress
F1	5	13,1
F2	20	44,44
F3	40	80,88
F4	60	117,3
F5	70	129,3

CG4983_q002		
	%	Pressure=Stress
F1	5	15,4
F2	20	70,3
F3	40	118,35
F4	60	178,39
F5	70	207,98

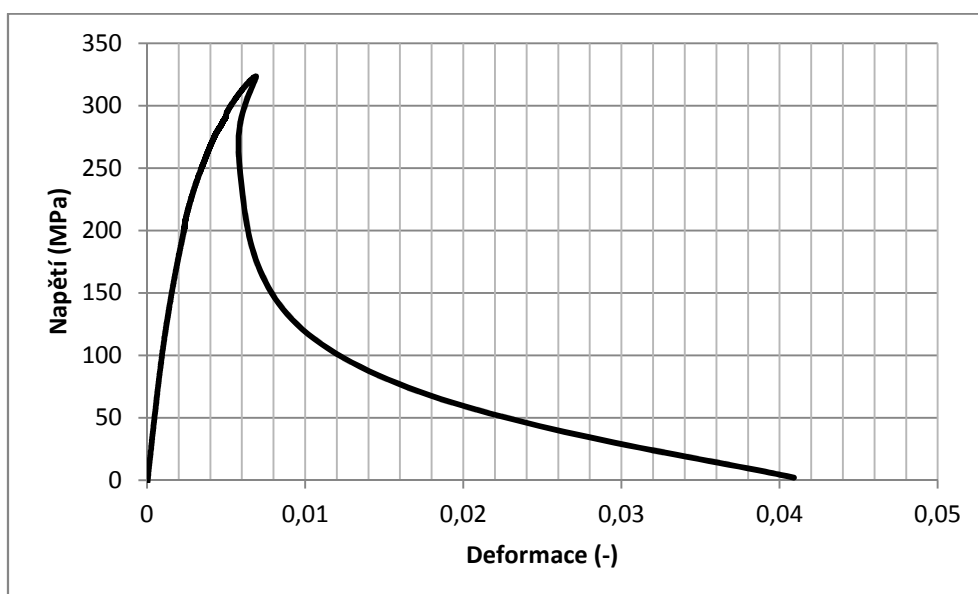
Tab. 6.2-6.3 Hodnoty tlaku (tahu) jako zatížení.



Obr. 6.3 Litina s červíkovým grafitem - cyklické



Obr. 6.4 Litina s lupínkovým grafitem - cyklické



Obr. 6.5 Deformační křivka pro litinu s lupínkovým grafitem

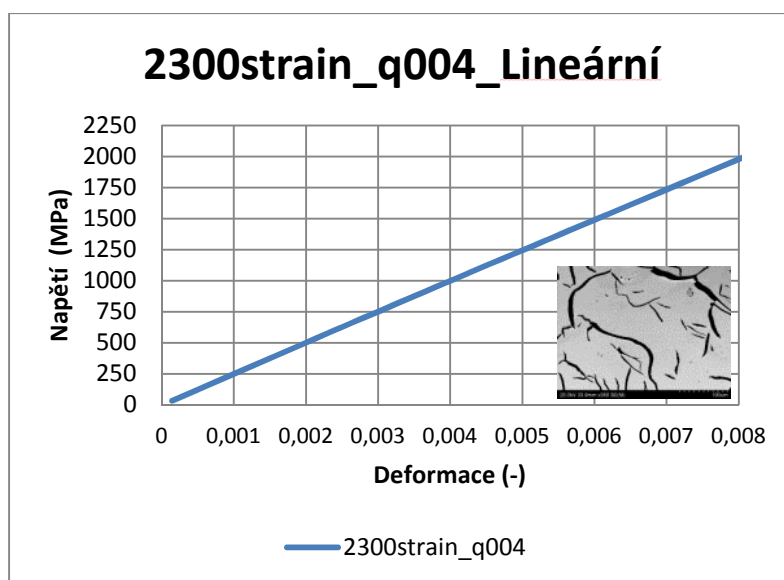
6.2 Processing

V tomto kroku byla provedena vizualizace nasimulovaných výsledků a na jejich základě se pak rozhodovalo v jakých simulacích a nastaveních budu rozumné pokračovat a ve kterých nemá smysl nadále pokračovat. Na dostupných výsledcích jsou zobrazeny maximální a minimální hodnoty Tahu a Tlaku ve směru 11 (osa X) a ve směru 22 (osa Y). Detailnější výsledky jednotlivých simulačních výsledků jsou pak umístěny v příloze 2.

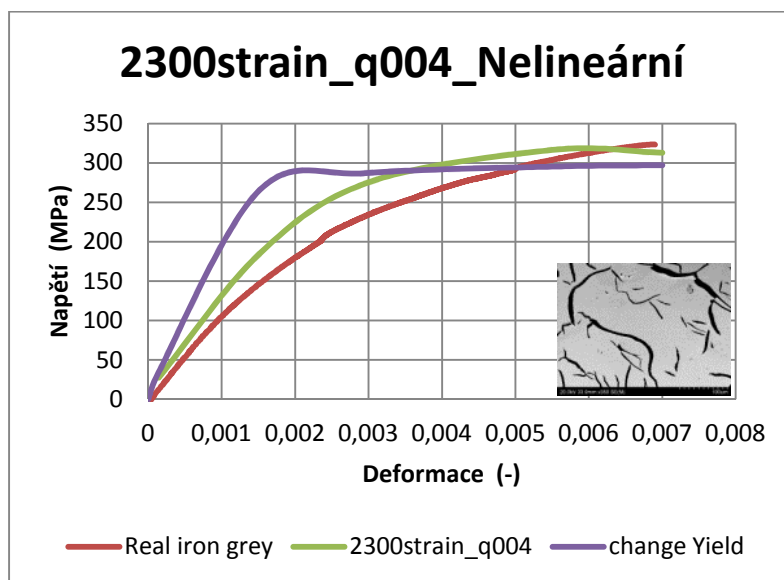
6.3 Post-processing

Tato kapitola je zaměřena na vyhodnocení výsledků. Po posouzení simulací nejvíce vyhovuje simulace „Vázaným kontaktem“, proto následují vyhodnocené výsledky pouze z těchto simulací.

6.3.1 Výsledky „Vázaný kontakt“ vzorek 1 (2300strain_q004)



Obr. 6.6 Lineární simulace pro vzorek 1 (model 2300strain_q004).

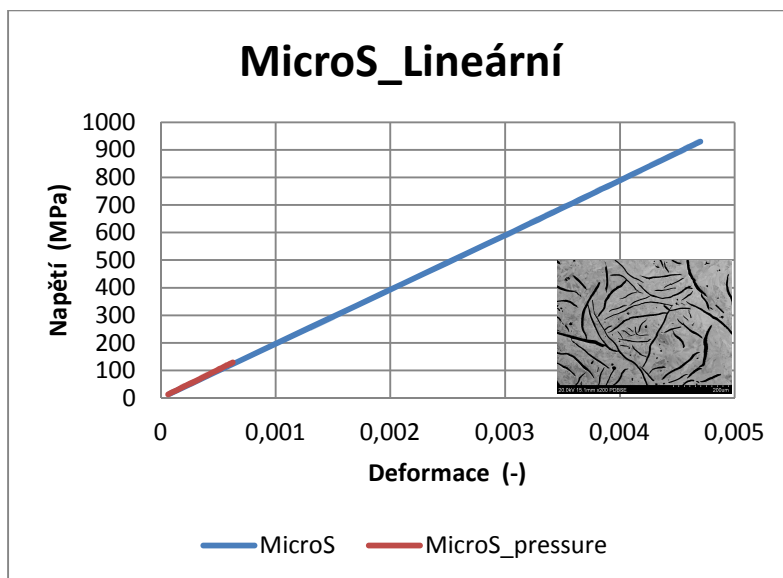


Obr. 6.7 Nelineární simulace pro vzorek 1 (model 2300strain_q004).

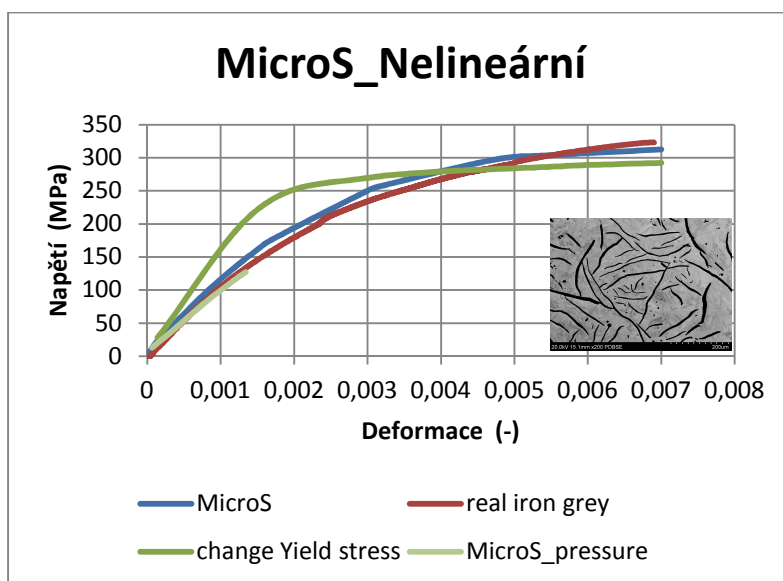
Na obr. 6.7 jsou výsledky pro nelineární simulace, kde se nalézají tři křivky. Zelená křivka s označením „2300strain_q002“ vykresluje výsledky simulací pro zatížení ve formě posunutí (Makro zatížení). Červená křivka s označením „Real iron grey“ vykresluje výsledky pro

skutečnou litinu s lupínkovým grafitem (experimentální měření obr. 6.5). Fialová křivka s označením „change Yield“ vykresluje výsledky pro simulace se zatížením ve formě posunutí (Mikro zatížení).

6.3.2 Výsledky „Vázaný kontakt“ vzorek 2 (MicroS)



Obr. 6.8 Lineární simulace pro vzorek 2 (model MicroS).

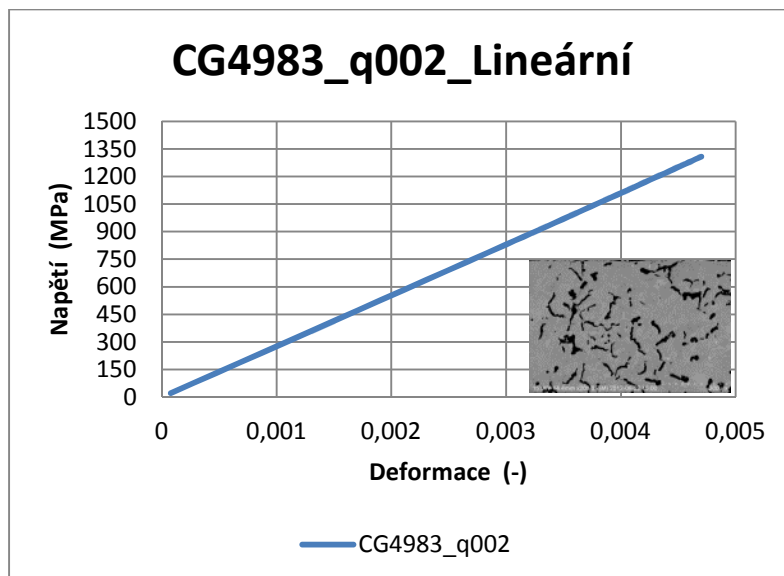


Obr. 6.9 Nelineární simulace pro vzorek 2 (model MicroS).

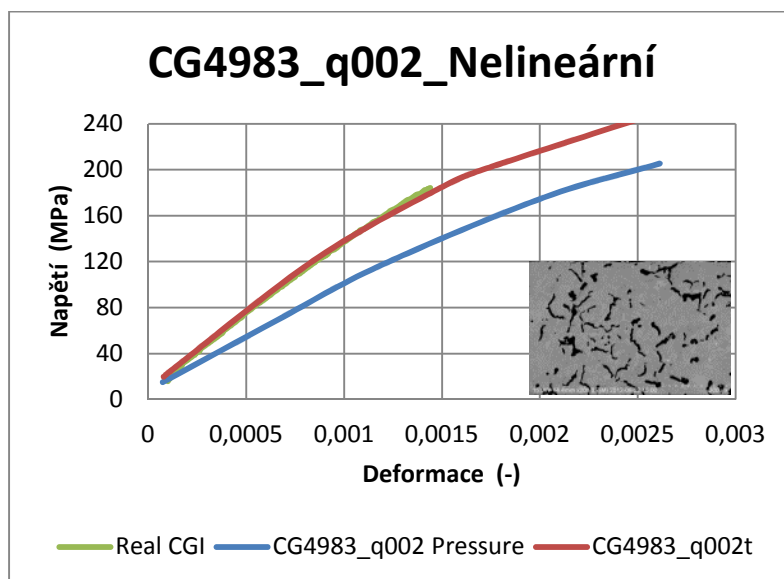
Na obr. 6.9 jsou výsledky pro nelineární simulace, kde se nalézají čtyři křivky. Modrá křivka s označením „MicroS“ vykresluje výsledky pro simulace se zatížením jako posunutí (Makro zatížení). Červená křivka s označením „real iron grey“ vykresluje výsledky pro skutečnou litinu s lupínkovým grafitem (experimentální měření obr. 6.5). Zelená křivka s označením „change Yield stress“ vykresluje výsledky pro simulace se zatížením jako posunutí (Mikro

zatížení). Světla zelená křivka s označením „MicroS_pressure“ vykresluje výsledky pro simulace se zatížením ve formě tlaku.

6.3.3 Výsledky „Vázaný kontakt“ vzorek 3 (CG4983_q002)



Obr. 7.0 Lineární simulace pro vzorek 3 (model CG4983_q002).



Obr. 7.1 Nelineární simulace pro vzorek 3 (model CG4983_q002).

Na obr. 7.1 je možné vidět tři křivky. Červená křivka s označením „CG4983_q002t“ udává výsledky pro simulační výpočty se zatížením jako posunutí (Makro zatížení). Zelená křivka výsledků s označením „Real CGI“ je pro skutečnou litinu s červíkovým grafitem (experimentální měření). Modrá křivka „CG4983_q002 Pressure“ označuje výsledky simulačních výpočtů při zatížení ve formě tlaku.

7 Diskuze výsledků

Výsledky práce první části posloužily k získání poznatků o tepelných procesech v soustavě odlitek - mezera - kovová forma. Jedná se o proces sdílení tepla, který je tvořen prouděním, vedením a sáláním. Toto sdílení je především ovlivněno součinitelem přestupu, prostupu tepla, resp. tepelným přechodovým odporem. Výsledky by měly posloužit k pochopení tepelných poměrů při gravitačním lití do ocelových forem. Také by měly ozřejmit vliv veličin na kvalitu simulačních výpočtů a způsob jakým je ovlivňují.

Odlévání slévarenských materiálů do kovových forem, jinak známých jako kokily, je složitý tepelně-fyzikální děj. Tyto děje lze ovlivnit různými důležitými vlivy, které jsou následovně zmíněny. Pro řešení prvního tématu, kterým je problematika sdílení tepla, je nutné rozdělit získané poznatky do dvou částí. První částí je zpracování teoretického základu, včetně popisu možných metod dostupných simulací. Druhou částí jsou experimenty a jejich kombinace se simulačními výpočty gravitačního lití do ocelových forem. Kombinací je myšlena zpětná simulace získaných teplotních polí z experimentu.

Výsledky a poznatky z řešení z první části práce lze shrnout do několika bodů:

1) Jak již bylo zmíněno, z hlediska tepelně-fyzikálních dějů, se jedná o složité procesy. K řešení tepelných dějů přispěli Havlíček a Příbyl, kteří se zaměřili ve svých pracích [54],[56],[57] na hutnické slévárenství. Použití simulačních programů a výpočetní techniky při řešení tuhnutí a chladnutí odlitků větších rozměrů se zmiňují publikace autorů Hlouška, Kavičky.

Rešerše uvádí základy i podrobnosti o tepelných procesech v odlitku a formě. Na jejím základě lze říci, že řešení zmíněné problematiky je poměrně komplikované. Důvodem je přeměna fází v celém tepelném procesu lití, tuhnutí a chladnutí. Tento proces lze ovlivnit různými faktory, jako např. počáteční teplota formy a lití, charakteristika odlévaného materiálu, podmínky lití, atd. Vzhledem ke složitosti tepelných dějů, nelze úplně vytvořit přesný matematický popis pro jejich řešení. Z toho důvodu přicházejí na scénu numerické simulační výpočty, určené k řešení složitých matematických modelů.

Jak je známo, mezi odlitkem a formou dochází při gravitačním lití ke vzniku plynové mezery, která způsobuje odpor při transportu tepla z tuhnoucího odlitku do ocelové formy. Tepelný odpor mezery má vliv na sdílení tepla, které lze charakterizovat pomocí součinitele prostupu tepla β .

2) Podmínky vzniku plynové mezery, která je součástí mezery, závisí na mnoha faktorech. Obecně je známo, že vzniká v důsledku smršťování odlitku během tuhnutí a tepelné roztažnosti kovové formy. Smršťování může být popisováno jako zmenšování objemových rozměrů ztuhlého kovu, vztaženou na rozměry taveniny. V intervalu mezi teplotou lití a teplotou zchladnutí materiálu, dochází ke třem různým smršťování:

- a) K prvnímu smršťování dochází ve stavu tekutém. To znamená, že k němu dochází mezi dobou vlití taveniny do formy a dobou počátku tuhnutí. V případě celé fázové přeměny se jedná o největší smršťování, které závisí na teplotě přehřátí taveniny.
- b) Ke druhému dochází při tuhnutí odlitku. V tomto případě to znamená, že k němu dochází v intervalu začátku teploty likvidu a konci teploty solidu. Jedná se o vnitřní smršťování, ke kterému dochází za uvolňování latentního krystalizačního tepla a pokračuje až do úplného ztuhnutí taveniny. Zajímavou vlastností může být negativní smrštění při tuhnutí odlitku. K takovému to smrštění dochází například u hliníku nebo i u litiny s lupínkovým grafitem.
- c) Třetí začíná v tuhém stavu, které odpovídá rozmezí teplot solidu až okolí. Toto smrštění je označováno jako vnější smrštění. Jedná se o smrštění na jehož základě se provádějí konstrukční návrhy odlitků (přídavek na smrštění).

Velikost celkového smrštění je nakonec dána algebraickým součtem jednotlivých velikostí smrštění. Ve skutečnosti je to o něco složitější, protože se ještě rozlišují lineární nebo objemová smrštění. K objemovému smrštění dochází při ochlazování polymorfních kovů nebo slitin. To odpovídá objemovým změnám, které jsou způsobovány překrystalizací.

Výsledkem smrštění je zmenšení rozměrů vůči rozměrům dutiny formy. Velikost smrštění se může u odlitků lišit se směrem růstu krystalické fáze a je závislá na chemickém složení, teplotě lití, konstrukci odlitku a druhu formy. Právě s druhem použité formy se velikost smrštění značně mění. Příkladem může být kokila u které je smrštění vždy větší, než smrštění u pískové formy. Dalším ovlivňujícím faktorem je doba, kdy ke smršťování dochází na odlitku. Tento čas se s každou změnou materiálu mění také. Příkladem může být ocel na odlitky, která se začíná smršťovat hned po odlití, opakem je například hliník, který se po odlití smršťuje pozvolněji.

Hlavní složkou mezery, která vzniká v důsledku smršťování, je vzduchová vrstva. Velikost vzduchové mezery je závislá na hlavních a vedlejších faktorech. Mezi hlavní faktory se řadí lineární smrštění tuhnoucího odlitku a dilatace kokily, ke které dochází vlivem prohřátí.

Vedlejšími činiteli jsou deformace odlitku a kokily, teplota lití, počáteční teplota kokily, atd. Plynová vrstva vzniká za určitý časový úsek po odlití a ve své podstatě vytváří tepelný odpor mezi odlitkem a formou. Velikost mezery, resp. tloušťka je ovlivňována dilatací formy, z tohoto důvodu dochází k jejímu vzniku převážně při lici kokily.

3) Z nespočtu provedených simulačních výpočtů vyplývá, že je náročné dosáhnout shodných nasimulovaných výsledků s experimentálně zjištěnými časovými závislostmi teplot v odlitku a kokile. A to jak z hlediska výpočtového času, tak i správného nastavení pro popis tepelných dějů v simulačním výpočtu. I proto se dá konstatovat, že se jedná o poměrně složité tepelné děje. Je nutné postupovat systematicky, aby se eliminovalo velké množství simulačních výpočtů nutných k určení součinitelů a zároveň tím zpřesnily výsledky analýz. Použitý simulační program QuikCAST, využívá stejné rovnice pro výpočet přenosu tepla formou vedení a proudění (gravitační a tlakové lití do kovových forem).

Všechny technologie lití využívající kovových forem jsou doprovázeny vznikem plynové mezery. Vznik mezery je patrný z průběhu teploty na lici formy, který v okamžiku chladnutí vykazuje neobvyklý nárůst (projev sálavého tepla tuhnoucího odlitku při odlehnutí od líce formy) a následně jeho pokles (dochází k vyrovnání sálavého tepla a tepla v mezeře). Mezeru lze definovat tepelným přechodovým odporem, který charakterizuje přenos tepla z odlitku do formy. U simulačních výpočtů nelze dosáhnout kýžené prodlevy na výsledné tepelné křivce při vzniku mezery. I když je možné definovat tepelný přechodový odpor, použitý program tuto možnost postrádá. Ve formách menších rozměrů, stejně jako je tomu v případě formy použité u experimentů, není vždy patrná prodleva průběhu teploty při vzniku mezery, obzvláště u předeřáté kokily. Je to způsobeno vznikem mezery, která má maximálně několik desetin mm.

4) Pro měření časových závislostí teplot v odlitku a ve formě byla použita USB-data sběrnice OMEGA OMB-DAQ-56, která je v dnešní době snadno dostupná. Sběrnice byla spolu s laptopem propojena pomocí univerzální sériové linky a tím tak vytvořila spolu s termočlánskou základ měřicího zařízení. Výhodou použitého vybavení je nezávislost na elektrické síti (vlastní zdroj, baterie), která by mohla vytvářet rušení a znehodnocovat výsledky měření. Použitá ocelová forma byla z materiálu (ČSN 19 552), který byl navržen pro kokily určené ke gravitačnímu lití v automobilovém průmyslu. Gravitačním litím do kokil lze vyrábět odlitky typu blok motoru nebo písty spalovacích motorů ze slitin hliníku. Termočlánsky určené k měření teploty líce formy při tuhnutí a chladnutí odlitku byly opatřeny

korundovou dvoukapilárou a umístěny na líc formy tak, aby nedocházelo k ovlivňování odvodu tepla z měřeného místa formy.

5) Ze všech prováděných experimentů byly vybrány jen některé experimenty, které dále napomáhaly při řešení tepelných dějů mezi odlitkem a kovovou formou pomocí simulačních výpočtů. Výsledky experimentů získané při řešení této práce lze popsat takto:

a) U experimentů bylo snahou dosáhnout stejných teplot lití. Vyšší teplota lití prodlužuje dobu tuhnutí odlitku. Přesto nelze stoprocentně zaručit schodu teplot lití (je zde mnoho faktorů, které mohou ovlivnit proces lití).

b) Na základě experimentů je zřejmé, že čím je teplota formy nižší, tím je doba tuhnutí odlitku kratší. Vysvětlením je větší ochlazovací schopnost slévárenské formy. Příčinou je také vyšší teplotní gradient mezi povrchem odlitku a lícem slévárenské formy, který může být díky hliníku zhruba 453 [°C] a díky zinku zhruba 305 [°C] při počáteční teplotě kokily 20 [°C]. S rostoucí vzdáleností od líce formy teplotní gradient neustále klesá. Opakem tomu je gradient teploty u přehřáté kokily, kdy mezi jednotlivými místy kokily je gradient velice nízký.

c) U slitin hliníku nejsou rozdíly teplotních gradientů, při odlévání do studené kokily a do přehřáté, tak výrazné jako tomu je při odlévání čistého hliníku. To lze dobře posoudit na době tuhnutí odlitku tvaru desky z čistého hliníku a ze slitiny hliníku (AlSi12). Čistý hliník díky absenci přidaných prvků tuhne kratší dobu než je tomu u slitin.

6) Díky kombinaci experimentálních měření a simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitku byl zkoumán vliv jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin. Veškeré simulační výpočty probíhaly v programu QuikCAST od firmy ESI Group. Ze simulačních výpočtů vyplynulo, že na kvalitu simulačních výpočtů mají vliv charakteristiky odlévaného materiálu, jako je součinitel tepelné vodivosti, latentní krystalizační teplo, měrná tepelná kapacita i teplota krystalizace. Dalším prvkem, který byl analyzován a který má velký vliv na rozložení teplot ve formě je součinitel tepelné vodivosti formy. Nejvýznamnější veličinou, která má vliv na přesnost simulačních výpočtů je součinitel přestupu, resp. prostupu tepla β .

Uváděné poznatky potvrzují důležitost získávání hodnot součinitele prostupu tepla s využitím experimentálních měření gravitačního lití, pro popis tepelných dějů mezi odlitkem a

slévárenskou formou. Na základě provedených analýz lze říci, že se dosažené časové závislosti teplot v ose odlitku pro jednotlivá experimentální měření vcelku shodují. Rozložení teplot ve formě za pomoci simulace v porovnání s experimenty 1, 8, 9 také shodují. Výjimkou jsou simulační výpočty rozložení teplot ve formě pro experimenty 3, 5, 10, které vyžadují modifikaci součinitele tepelné vodivosti pro formu tak, aby bylo dosaženo potřebné schody.

7) Sledováním teplotních závislostí součinitele prostupu nebo přestupu tepla mezi formou a odlévány mi neželeznými kovy, jako je hliník, zinek nebo slitina hliníku je vidět patrný vliv plynové mezery na součinitel prostupu tepla, v tomto případě na tepelný přechodový odpor. Důvodem proč je potřebné získávat tepelně-fyzikální veličiny, mezi které hlavně patří součinitel prostupu nebo přestupu tepla, je dosáhnout kvalitních výsledků tuhnutí a chladnutí odlitku v kokilách.

Tepelné děje, které nastávají těsně po odlití taveniny do slévárenské formy, lze označit jako intenzivní přestupy tepla, ke kterým dochází díky těsnému styku taveniny s formou. Po uplynutí času nutného k tuhnutí odlitku se tato intenzita přestupu tepla mění s klesající tendencí. To pokračuje do chvíle vzniku plynové mezery mezi ztuhlou vrstvou taveniny a slévárenskou formou. V tomto okamžiku dochází ke změně těsného styku a tím i současně ke změně součinitele přestupu tepla na součinitel prostupu tepla. Jelikož je prakticky nemožné vystihnout přechod mezi jednotlivými součiniteli, je přenos tepla řešen komplexním součinitelem označovaným jako součinitel prostupu tepla.

Z tohoto důvodu se stává součinitel prostupu tepla velmi důležitou veličinou, která popisuje tepelné děje v systému odlitek - mezera - forma a tím se stává důležitou i při řešení výsledných teplotních závislostí této práce. Byly potvrzeny závislosti tohoto součinitele s experimentálními podmínkami, mezi které patří teplota formy (předehřev), teplota taveniny (teplota odlévání), atd. Předpokladem je, že s klesající teplotou formy součinitel prostupu tepla stoupá. Při řešení této práce se vliv předehřevu formy na součinitel potvrzuje. Také je ale vidět nepatrný rozdíl ve velikosti součinitele v samotném počátku tuhnutí.

Hodnotí-li se součinitel prostupu tepla v závislosti na teplotě při experimentech odlévání čistého hliníku do studené ocelové kokily 220 x 220 x 220 [mm] (materiálu 19 552), na výsledcích je vidět rostoucí charakter hodnot součinitele prostupu tepla s rostoucí teplotou odlitku. Vše je patrné z tabulky 4.0, kde je zaznamenána nejvyšší hodnota součinitele prostupu tepla při teplotách 800 [°C] a 700 [°C], která odpovídá hodnotě 4000 [W.m⁻².K⁻¹] při teplotě formy okolo 20 [°C] bez ošetření líce formy. Narůstáním počáteční teploty formy také

dochází ke změně hodnoty součinitele prostupu tepla β . Jak je možné vidět v tabulce 4.2 a na obr. 4.2.3, předehřev kokily ovlivnil součinitel prostupu na tolik, že jsou jeho hodnoty vyšší (menší tepelný přechodový odpor) než tomu je u studené formy. To pokračuje až do přibližné teploty likvidu materiálu, kde hodnoty součinitele klesnou pod hodnoty studené formy. Dále pokračuje klesající tendence hodnot viz obr. 4.4.8. Při teplotě formy 185 [°C] hodnota součinitele při teplotách 800 [°C] a 700 [°C] je 4500 [W.m⁻².K⁻¹].

Podobně jako u hliníku, tak i u čistého zinku se opakuje charakter křivek graficky znázorněného součinitele prostupu tepla viz obr. 4.2.8 nebo 4.4.8. Pokud tedy sledujeme výsledky odlévání čistého zinku do ocelové kokily o teplotě 20 [°C], pak hodnota součinitele prostupu tepla při teplotě odlitku 600 [°C] je 3800 [W.m⁻².K⁻¹]. S předehřevem formy (na teplotu 320 [°C]) se hodnoty součinitele příliš nemění. Pouze kolem teploty likvidu se projevuje pokles, nárůst a opět pokles na hodnoty blízké hodnotám odpovídající studené formě, vše je patrné z tabulky 5.2.

Pro slitiny hliníku AlSi12 se opět charakter křivek graficky znázorněného součinitele prostupu tepla nemění viz obr. 4.4.3. Sledováním výsledků odlévání slitiny AlSi12 do ocelové kokily o teplotě 20 [°C] zjistím, že hodnota součinitele prostupu tepla při teplotě odlitku 800 [°C] je 1100 [W.m⁻².K⁻¹]. S předehřevem kokily na cca 340 [°C] hodnota součinitele stoupne na 4000 [W.m⁻².K⁻¹] než se teplota odlitku přiblíží teplotě likvidu, pak se stává hodnota součinitele menší než u studené formy a postupně klesá. Ve všech případech experimentu se jednalo o formy bez ošetření líce formy nástřikem.

Také je dobré zmínit, že získané hodnoty součinitele prostupu tepla β jsou při nižších teplotách mezi 20 až 400 [°C] nižší než je tomu v počátcích tuhnutí. Jejich souhrnný seznam spolu s hodnotami tepelného přechodového odporu je možné vidět v tabulce 5.2 nebo jednotlivě v tabulkách 4.0, 4.2, 4.4, 4.6, 4.9 a 5.1. Grafické závislosti hodnot součinitele prostupu tepla pro všechny výsledné simulace je možné vidět na obrázku 4.4.8. Z grafických závislostí je patrné, jak součinitel prostupu tepla úzce souvisí s teplotou likvidu příslušného odlévaného materiálu, kdy v blízkosti této teploty dochází k výrazné změně součinitele prostupu tepla v důsledku předehřátí formy (teplota likvidu zinku 419.5 [°C], hliník 670 [°C], AlSi12 562 [°C]).

Výsledky práce druhé části posloužily k získání poznatků o chování struktury odlitku po odlití. Výsledky by měly posloužit k pochopení chování vazeb mezi grafitem a matricí v rámci působení vnějších sil a napětových stavů. Také by měly ozřejmit vliv mechanických vlastností na kvalitu simulačního výpočtu a jakým způsobem je ovlivňují. Na základě odborných výsledků se práce zaměřila na tvorbu výpočtového simulačního modelu struktury grafitické litiny. Vliv kvality výpočtového simulačního modelu struktury na výsledky analýz je značný. Práce za pomoci vytvořeného simulačního modelu pokračovala simulačními výpočty mikrostruktury grafitické litiny zatěžované vnějšími silami. Důležitým modelem pro řešení dané problematiky byl model litiny s lupínkovým grafitem. Tato litina je důležitým konstrukčním materiálem pro výrobu dílů v automobilovém průmyslu (bloky a válce spalovacích motorů, brzdové kotouče a bubny, pístní kroužky, atd.).

Platila zde základní myšlenka pro predikci chování litiny s lupínkovým grafitem při zatížení vnější silou. Předpokladem bylo, že vazby mezi matricí a grafitem jsou pevné nebo dochází ke tření mezi těmito dvěma strukturními součástmi (grafitem a matricí). Na základě těchto předpokladů bylo přistoupeno k sestavení simulačního modelu. Tento výpočtový model byl založen na numerické metodě konečných prvků (FEM). Modely vycházely z mikrostruktury litiny s lupínkovým grafitem a z mikrostruktury litiny s červíkovým grafitem. K tomuto účelu byly použity tři typy mikrostruktury litiny a to proto, aby mohly být do modelu zahrnuty vlivy velikosti a rozložení grafitu.

Výsledky a poznatky z řešení z druhé části práce lze shrnout do několika bodů:

1) Modelováním a výpočty mikrostruktur se už zabývali práce [42], [43], [44]. Bylo použito zjednodušeného 3D modelu struktury. Na základě pravděpodobnosti byl vytvořen zjednodušený tvar grafitu a následně byl využit při simulačních výpočtech zatěžování mikrostruktury. Tématem, který se zabývá elastickými a plastickými deformací za pomoci simulačních výpočtů mikrostruktury, se zabývali práce [45], [46]. Opět bylo využito zjednodušeného 3D modelu struktury.

Rešerše uvádí základy i podrobnosti o grafitických litinách, jejich rozdělení a popis. Dále obsahuje informace o mechanických vlastnostech a jejich určování. Zaměřuje se i na termomechanické vlivy působící v materiálu používaného výrobku. Tento základ napomohl při definování zatížení v simulačních výpočtech. Vzhledem k tomu, že není úplně známo chování vazeb mezi grafitem a matricí, byl vytvořen výpočtový model, který vytváří

matematický popis pro jejich řešení. Z toho důvodu přicházejí na scénu numerické simulační výpočty určené k řešení složitých matematických modelů.

2) Pro simulace vazeb na úrovni mikrostruktury se vycházelo ze tří možných předpokladů:

- a) předpokladem bylo, že grafit se díky své malé pevnosti, vůbec nepodílí na celkové pevnosti celé struktury. To odpovídá nastavení rozhraní mezi grafitem a matrice označené jako "Dutiny (bez grafitu)".
- b) předpokladem bylo, že vazby mezi matricí a grafitem jsou pevné na tolik, že nedochází k žádnému rozpojení během zatížení. To odpovídá nastavení rozhraní mezi grafitem a matrice označené jako "Vázaný kontakt".
- c) předpokladem bylo, že dochází ke tření mezi těmito dvěma součástmi struktury (grafitem a matricí). To odpovídá nastavení rozhraní mezi grafitem a matrice označené jako "Vzájemně působící kontakt".

Simulace byly provedeny ve dvou variantách nastavení materiálových vlastností struktury. První simulace probíhaly s lineárními vlastnostmi materiálu, kdy se zanedbává plasticita materiálu. Po zhodnocení výsledků bylo zřejmé, že toto nastavení nepostačuje a od dalšího používání lineárního nastavení se ustoupilo. Další analýzy už pokračovaly s nelineárním nastavením materiálových vlastností.

Na základě všech provedených simulačních výpočtů (viz příloha 2) a vyhotovených deformačních charakteristik bylo možné říci, která definice rozhraní popisuje reálný stav chování mezi grafitem a matricí. Nejvíce se tomu blížilo nastavení "Vzájemně působící kontakt". To vede k závěru, že grafit se podílí na celkové pevnosti celé struktury i s tak malou vlastní pevností. A přenos zatížení není distribuován celým svým objemem (pouze částečně - přenos třením).

3) Z mnoha provedených simulačních výpočtů (viz příloha 2) vyplývá, že je náročné dosáhnout shody nasimulovaných výsledků se skutečnou strukturou. Nejen z hlediska výpočtového času, ale i z hlediska správného nastavení rozhraní mezi grafitem a matricí. To se váže i k mechanickým vlastnostem grafitu a matrice. Je nutné postupovat systematicky, aby se eliminovalo velké množství simulačních výpočtů a zároveň tím zpřesnily výsledky analýz. Pro řešení všech simulačních výpočtů byl použit simulační program ABAQUS, který je založený na metodě konečných prvků (MKP).

4) Ze všech prováděných simulačních výpočtů byly vybrány jen ty, které odpovídaly reálným mechanickým vlastnostem. Čímž napomohly i při ověřování správných hodnot mechanických vlastností použitých k popisu jednotlivých částí mikrostruktury. Výsledky získaných analýz při řešení této práce lze popsat takto:

- a) Bylo snahou dosáhnout stejných deformačních charakteristik jako na reálných vzorcích. Nelze však zaručit stoprocentní schodu výsledných deformačních křivek.
- b) Bylo snahou zvolit a nastavit správné okrajové podmínky na rozhraní grafit - matrice, tak aby dostatečně popisovaly reálné chování ve struktuře.
- c) Každý bod (hodnota $F-\Delta l$) deformační charakteristiky odpovídá jednomu simulačnímu výpočtu. Celková charakteristika je tvořena šesti body, to odpovídá šesti simulacím pro jeden model.

Uváděné poznatky potvrzují správnost použitých mechanických vlastností a použitých okrajových podmínek. Na základě provedených analýz je možné říci, že dosažené deformační charakteristiky se vcelku shodují s charakteristikami z reálného měření. Průběhy zmiňovaných charakteristik je možné vidět na obrázcích 6.7, 6.9 a 7.1.

Hodnocení výsledků deformačních křivek

Deformační charakteristiky pro vzorek 1 (model 2300strain_q004) jsou na obr. 6.7. Obrázek obsahuje výslednou charakteristiku pro nelineární simulace označenou „2300strain_q002“. Jedná se o výsledky simulačních výpočtů pro zatížení ve formě posunutí (Makro zatížení), kdy při maximální deformaci 0,007 [-] dosahuje napětí 312,8 [MPa]. Dále obsahuje deformační křivku s označením „Real iron grey“, která patří skutečné litině s lupínkovým grafitem a při maximální deformaci 0,007 [-] dosahuje napětí 323,7 [MPa]. Poslední deformační křivkou s označením „change Yield“ je výsledná charakteristika pro simulační výpočty, kde je zatěžující síla ve formě posunutí (Mikro zatížení), kdy při maximální deformaci 0,007 [-] dosahuje napětí 297 [MPa].

Deformační charakteristiky pro vzorek 2 (model MicroS) jsou na obr. 6.9. Ten obsahuje výslednou charakteristiku pro nelineární simulace označenou „MicroS“ a zobrazuje výsledky pro simulační výpočty se zatížením ve formě posunutí (Makro zatížení), kdy při maximální deformaci 0,007 [-] dosahuje napětí 312,3 [MPa]. Dále obsahuje deformační křivku s označením „real iron grey“, která patří skutečné litině s lupínkovým grafitem a při maximální deformaci 0,007 [-] dosahuje napětí 323,7 [MPa]. Deformační křivka s označením

„change Yield stress“ je výsledná charakteristika pro simulační výpočty, kde je zatěžující síla ve formě posunutí (Mikro zatížení). U poslední deformační křivky s označením „MicroS_pressure“ se jedná o výsledky pro simulační výpočty se zatížením ve formě tlaku. Pro její úplný průběh by bylo nutné provést mnohem více simulací, proto nepokračuje až do maximální deformace.

Deformační charakteristiky pro vzorek 3 (model CG4983_q002) jsou na obr. 7.1. Obrázek v sobě zahrnuje výslednou charakteristiku pro nelineární simulace označenou „CG4983_q002t“. Jedná se o výsledky simulačních výpočtů pro zatížení ve formě posunutí (Makro zatížení) kdy při maximální deformaci 0,007 [-] dosahuje napětí 321,3 [MPa] a při deformaci 0,00129 [-] dosahuje napětí 180 [MPa]. Dále je na obrázku deformační křivka s označením „Real CGI“, která patří skutečné litině s červíkovým grafitem a při deformaci 0,00129 [-] dosahuje napětí 184,1 [MPa]. U poslední deformační křivky s označením „CG4983_q002 Pressure“ se jedná o výsledky pro simulační výpočty se zatížením ve formě tlaku. Ta dosahuje při deformaci 0,00129 [-] (stejná deformace jako předešlé dvě charakteristiky) napětí 136 [MPa].

8 Závěr

Doktorská práce je zpracovaná na téma: „Numerické simulační výpočty ve slévárenských procesech a materiálech“, svým obsahem přispívá ke sledování tepelných procesů ve formě při odlévání dvou neželezných kovů (hliník, zinek), které jsou v dnešní době hojně využívány jako hlavní prvky slitin určených pro výrobu lehkých odlitků. Z tohoto důvodu práce obsahuje i sledování tepelných procesů ve formě při odlévání slitiny hliníku (AlSi12). Dalším příspěvkem této práce je vytvoření výpočtového simulačního modelu mikrostruktury grafitické litiny, s jehož pomocí lze simulovat a predikovat chování litiny s lupínkovým grafitem při zatěžování vnější silou.

Práce se dělí na dvě části a to na rešeršní a experimentálně-výpočtovou.

Rešeršní část práce obsahuje souhrn základních principů přenosu tepla, které tvoří základy pro tepelné děje v systému odlitek – mezera – forma. Tím je myšleno sdílení tepla ve slévárenské formě a na jejím povrchu a sdílení přes mezeru vytvářející přechodový odpor. Také je vylíčena metoda výpočtu řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla v trojrozměrném prostoru a její popis. Součástí je charakteristika fyzikálních a tepelně fyzikálních veličin pro formu a odlévané materiály. Nedílnou součástí rešerše je obsah o litinách. Obsahuje charakteristiku grafitických litin a popis jejich struktur. Důležitou částí potřebnou k řešení obsahu o litinách je kapitola popisující výpočet deformačních charakteristik a kapitola o mechanických vlastnostech. Mechanické vlastnosti napomáhají pochopit a definovat chování grafitové litiny (LLG).

Experimentálně výpočtová část je rozdělena do tří oblastí:

- a) Bylo provedeno několik experimentálních měření odlévaných slévárenských materiálů (čistý hliník, čistý zinek a slitina AlSi12) do ocelové kokily, přičemž byly sledovány časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v definovaných místech ocelové formy, bez ošetření líce formy.
- b) Na základě metody zpětné simulace byly provedeny simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitku, probíhající za stejných podmínek jako prováděné experimenty, při kterých byly stanoveny teplotní závislosti součinitele prostupu tepla β pro jednotlivé experimenty.
- c) Byly vytvořeny tři různé výpočtové simulační modely mikrostruktury grafitické litiny z reálných snímků mikrostruktury. S pomocí výpočtových modelů byly provedeny simulační výpočty, které napomohly pochopit procesy nastávající v mikrostruktuře při

zatěžování vnější silou. Převážně se jedná o simulace vedoucí k predikci chování litiny s lupínkovým grafitem. K porovnání byly provedeny simulace i pro litinu s červíkovým grafitem.

Poznatky získané při řešení této práce jsou následující:

Pro simulační výpočty tepelných polí

1. Čisté neželezné kovy použité při řešení práce usnadnili získání potřebných tepelně-fyzikálních veličin, které byly určeny za pomoci prováděných simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitků. Takto získané veličiny napomohly i při simulačních výpočtech slitiny AlSi12 a MgAl5Mn používané při výrobě dílů v automobilovém průmyslu.
2. Při provádění laboratorních experimentů odlévání je nutné dbát na dodržování stejných podmínek. Při jejich nedodržení se projevuje zvýšená chyba měření na celkových výsledcích měřených experimentů.
3. Jednotlivé používané verze simulačního programu QuikCAST zaznamenaly pokrok při výpočtu plnění slévárenské formy a to přímo na definici tepelného přechodového odporu, resp. tepelné závislosti součinitele prostupu nebo přestupu tepla mezerou. Přesto je tu prostor ke zlepšování, za zmínku stojí třeba právě definice a simulace vzniku mezery a její vliv na celkovou tepelnou analýzu. Dalším může být rozšíření databanky používaných veličiny (materiálů).
4. Díky simulačním výpočtům byl zjištěn vliv jednotlivých tepelně fyzikálních veličin na stabilitu prováděných simulačních výpočtů. Součinitelem, který významně ovlivňuje průběh získaných výsledků ze simulací je součinitel prostupu tepla β . Dalším je součinitel tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity materiálu formy. S klesající tendencí pak následuje latentní teplo, součinitel tepelné vodivosti odlévaného materiálu a nakonec zbývající veličiny odlévaného materiálu.
5. Z poznatků prováděných experimentů v rámci této práce je důležité uvést, že simulační výpočty jsou velmi citlivé na použití přesných dat a fyzikálních veličin. Proto je často velmi náročné nalézt shodu naměřených výsledů a provedených simulačních výpočtů.
6. Pro prostup tepla jsou stanovené hodnoty součinitele β v systému odlitek - mezera - forma, souhrnně zaznamenány v tabulce 5.2 a grafu na obr. 4.4.8. Jedná se o součinitel prostupu tepla v závislosti na teplotě pro jednotlivá měření, která odpovídají daným podmínkám. Při teplotách vyšších než je teplota tání použitého materiálu, dochází na

rozhraní tavenina - forma k těsném styku. To má za následek vysokou hodnotu součinitele β a to hlavně pokud líc formy není ošetřen nátěrem.

Pro simulační výpočty mikrostruktur grafitických litin

1. Deformační křivky z experimentů napomohly definovat velikost zatěžujících stavu (zatěžující síly).
2. Na základě skutečných snímků mikrostruktur byly vytvořeny tři výpočtové modely určené pro simulační výpočty predikce chování grafitické litiny při zatěžování vnější silou. Jednalo se o dvě litiny s lupínkovým grafitem, lišící se ve velikosti a hustotě rozložení lupínků ve struktuře, a jednu porovnávací mikrostruktur s grafitem ve tvaru červíků.
3. Na základě výsledků získaných ze simulačních výpočtů je zřejmé, že strukturu litiny a její chování lze predikovat simulačním výpočtem. Z veškerých výsledků je patrné, že nejvíce se svými hodnotami přiblížila ke skutečnosti simulace s označením „Vázaný kontakt“. Přesto se zde nalézají rozdíly, které mohou mít několik příčin. Možné příčiny vzniklých rozdílů mezi křivkami ze simulačních výpočtů a z experimentu, mohou mít tři důvody:
 - a) Rozdíly mohou být způsobeny použitým rozhraním mezi grafitem a matricí na modelu. Právě proto, že ve skutečné litině mikrostrukтуры mohou vznikat mezi matricí a grafitem mezery.
 - b) Dochází ke kombinace dvou rozhraní a to, rozhraní označené jako „Vázaný kontakt“, které funguje na začátku deformace a rozhraní označované jako „Vzájemně působící kontakt“, ke kterému může docházet přibližně v polovině deformace. V závěru se deformace opět mění zpátky na rozhraní „Vázaný kontakt“.
 - c) Použité materiálové údaje mohou být nepřesné.
4. Výsledky simulačních výpočtů mikrostruktur vedou k závěru, že nehomogenní rozložení napětí je spojeno s rozložením grafitu ve struktuře.

Vlastní přínos práce

Práce dává do povědomí tepelné děje v kovových formách při gravitačním lití a za vzniku plynové mezery. Současně dokazuje vliv jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin na stabilitu simulačních výpočtů, které popisují sdílení tepla v systému odlitek - mezera - kovová forma. Sdílením tepla je myšlen celý tepelný proces, včetně tuhnutí a chladnutí odlitku.

Pokud jsou hodnoceny simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách, pak je možno konstatovat, že v současné době existuje celá řada simulačních programů. Kvalita získaných simulačních výpočtů úzce souvisí s hodnotami použitých tepelně-fyzikálních veličin. Program QuikCAST je určen spíše pro simulaci odlitků v pískových formách. Při simulaci gravitačního lití neumožňuje tento program simulovat vznik plynové mezery.

Zjištěné součinitele prostupu, přestupu tepla při odlévání vybraných slévárenských materiálů mohou být přínosné při praktickém používání. Do současnosti se v simulačních programech definoval součinitel prostupu nebo přestupu tepla při tepelných slévárenských výpočtech jako konstantní veličina, což vedlo k nepřesnostem tepelných výpočtů. I u první verze používaného programu bylo možné definovat pouze konstantní veličinu přestupu, prostupu tepla. Teprve až poslední používaná verze simulačního programu umožňovala definovat tuto veličinu v závislosti na čase resp. v závislosti na teplotě.

Předložená práce představuje řadu teplotních závislostí součinitele prostupu tepla pro používané materiály forem (bez nástřiku), pro gravitační lití i používané materiály a jejich slitiny, především pak AlSi12 nebo MgAl5Mn použité při ověřovacích simulačních výpočtech volantu řízení. Získané závislosti součinitele jsou potřebné pro kvalitní analýzy tuhnutí a chladnutí odlitků, především pak v automobilovém průmyslu.

Experimenty a provedené simulační výpočty ukazují velký význam stanovených závislostí prostupu tepla na teplotě. Současně se ukazuje získávání součinitele prostupu tepla mezery prostřednictvím zpětné simulace jako užitečný postup. Tímto způsobem se dá dosáhnout věrohodných výsledků. Proto by měly být simulační výpočty doprovázeny zjednodušenými experimenty. Na základě nich by pak výsledky a použité tepelně-fyzikální vlastnosti byly určitým způsobem podloženy a výsledky nebyly pouhou náhodnou nastavení.

Dále práce popisuje a prohlubuje znalosti o litinách s lupínkovým grafitem. Dokazuje vliv rozložení a velikosti lupínkových grafitů na celkovou pevnost struktury v tahu a tlaku. Tato znalost napomáhá pochopit procesy ke kterým dochází při cyklickém namáhání a jejich vliv na strukturu materiálu. K těmto procesům může docházet při termomechanickém namáhání na hlavě motoru na rozhraní sedel ventilů.

Simulační výpočty řeší mechanické namáhání na úrovni mikrostruktur, které jsou zatěžovány vnější silou. Výsledky dokazují nehomogenitu materiálu způsobenou vnějším tahovým

zatížením litiny. Pro zjištění vazeb mezi grafitem a matricí Práce obsahuje celou řadu simulačních výpočtů s různým popisem vazeb na rozhraní mezi matricí a grafitem. Na základě výsledků ze simulací byla vybrána vazba rozhraní, která může odpovídat charakteru vazeb v reálných strukturách.

Získané znalosti mohou napomoci při tvorbě dalších simulačních modelů využívaných pro jiné typy grafitických litin. Také mohou napomoci při predikci chování struktury v rámci působení napětíových stavů a vad dílů jež se zdají být z hlediska mechanických vlastností v bezpečných mezích. Za použití zpětných simulací mohou tyto znalosti pomoci při zjišťování mechanických vlastností jednotlivých částí struktur, které nejsou známi.

9 Použitá literatura

- [1] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách, 1 vyd. TU Liberec, Liberec 2002, 134 s, ISBN 80-7083-662-8
- [2] EXNER, J., NOVÁ, I.: Influence of heat transfer conditions coeff. of gap in the casting-metal mould system. In: Archives of foundry, Katowice 2001, Volume 1, s. 94 až 102.
- [3] TRBIŽAN, K.: Casting Simulation: Background a Examples, Ljubljana, Slovenia 2002, 346s, ISBN 961-90130-2-6
- [4] HORÁČEK, J.: Measuring a simulation calculations field of temperature cast the shape of the plate, 7. Mezinárodní PhD konference, 47. Slévárenské dny 23. - 24. června 2010, Sborník příspěvků ISBN 978-80-904020-6-5
- [5] HORÁČEK, J., NOVÁ, I: Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků z litiny, Univerzita J.E.Purkyně v Ústí n. Labem, Strojírenská technologie, prosinec 2011, číslo6, ročník XVI, ISSN 1211-4162 201164
- [6] RUS, J.: Tepelné poměry mezi odlitkem a kokilou při gravitačním lití, Liberec 2005, 221s.
- [7] NOVÁ, Iva, NOVÁKOVÁ, Iva, MACHUTA, Jiří. Závislost tvrdosti litiny s kuličkovým grafitem na množství křemíku. Strojírenská technologie, říjen 2011, č. 5, s. 18-24. ISSN 1211-4162 201153
- [8] NOVÁ, Iva, NOVÁKOVÁ, Iva, MACHUTA, Jiří. Litiny s červíkovitým grafitem – materiál pro výrobu tenkostěnných odlitků. Strojírenská technologie, září 2010, roč. XV, č. 3, s. 17-22. ISSN 1211-4162 201016.
- [9] MYNÁŘ, Jakub. Vliv průtočného množství taveniny ve formě na tvrdost a strukturu tenkostěnných odlitku z litiny s červíkovitým grafitem. Strojírenská technologie, červen 2008, roč. XIII, č. 2, s. 18-25. ISSN 1211-4162 200813.
- [10] HORÁČEK, Josef. FEM Study of Inhomogeneous Stress Distribution in Cast Irons. PhD Project, june 2013. LIU-IEI-TEK-A--13/01659--SE

- [11] NOVÁ, Iva, NOVÁKOVÁ, Iva, MACHUTA, Jiří. Závislost tvrdosti litiny s kuličkovým grafitem na množství křemíku. *Strojírenská technologie*, říjen 2011, č. 5, s. 18-24. ISSN 1211-4162 201153
- [12] HORÁČEK, Josef, NOVÁ, Iva. Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitku z litiny. *Strojírenská technologie*, prosinec 2011, č. 6, s. 12-17. ISSN 1211-4162 201164
- [13] NOVÁ, Iva, NOVÁKOVÁ, Iva, MACHUTA, Jiří. Litiny s červíkovitým grafitem – materiál pro výrobu tenkostěnných odlitků. *Strojírenská technologie*, září 2010, roč. XV, č. 3, s. 17-22. ISSN 1211-4162 201016.
- [14] MYNÁŘ, Jakub. Vliv průtočného množství taveniny ve formě na tvrdost a strukturu tenkostěnných odlitku z litiny s červíkovitým grafitem. *Strojírenská technologie*, červen 2008, roč. XIII, č. 2, s. 18-25. ISSN 1211-4162 200813.
- [15] HORÁČEK, Josef. FEM Study of Inhomogeneous Stress Distribution in Cast Irons. PhD Project, june 2013. LIU-IEI-TEK-A--13/01659--SE
- [16] ČECH, J.; JUŘIČKA, I.; BOUCNÍK, P. Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. In 5. Medzinárodná vedecká konferencia CO-MAT-TECH, Trnava, 14.10. – 15.10.1997.
- [17] H. Friedrich, S. Schumann, Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry, *Journal of Material Processing Technology*, 117, (2001), 276-281.
- [18] ŽYDEK, A., KAMIENIAK, J., BRASZCYŃSKA, K.N.: Evolution of Mg-5Al-0.4Mn microstructure after rare earth elements addition. *Archiver of Foundry Engineering*. ISSN (1897-3310), Volume 11, Issue 2/2011 pp. 157 – 160.
- [19] KIELBUS, A., RZYCHOŃ, T., CIBIS, R.: Microstructure of AM50 die casting magnesium alloy. *Journal of Achievements in Materials a Manufacturing Engineering*. Volume 18, Issue 1-2, September–October 2006.
- [20] RAGHAVAN, V.: Al-Mg-Mn (Aluminum-Magnesium-Manganese) *Journal of Phase Equilibria a Diffusion* Vol. 31 No. 1, 2010, p.46.
- [21] DRÁPALA, J., KUCHAR, L., TOMÁŠEK, K., TROJANOVÁ, Z. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík – příměs. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Ostrava, 2004. s. 6 – 31.

- [22] Technická dokumentace k slévárenskému simulačnímu programu QuickCAST.
- [23] Propagační materiály Aluminium Rheinfelden GmbH Rheinfelden alloys Verkauf und Kundenberatung Rheinfelden, Germany.
- [24] Technické materiály slévárenského programu QuikCAST ESI Group Headquarters, Francie.
- [25] The materials and their properties - magnesium alloys. Comparative training documents AREAS STIHL AG & Company – Germany
- [26] CHVORINOV, N.: Tuhnutí a krystalizace oceli. 1. vyd., Praha 1954
- [27] CHVORINOV, N.: Theorie der Erstarrung von Gussstücken. Die Giesserei 27, 1940, s. 177, 201, 222.
- [28] SCHWARZ, C.: Die rechnerische Behaltung der Abkühlungs - und Erstarrungsvorgänge bei Flüssigen Metall. Archiv für das Eisenhüttenwesen 5, 1931, s. 139.
- [29] RUDDLE, R, W.: The solidification of castings. [Ruský překlad Zatvrděvanije otlivok]. 1. vyd., Moskva 1960.
- [30] VEJNIK, A, I.: Približenyj rasčet processov teploprovodnosti. 1. vyd., Moskva 1959.
- [31] VEJNIK, A, I.: Teorija zatverdevanija otlivki. 1. vyd., Moskva 1960.
- [32] VEJNIK, A, I.: Termodinamika litejnoj formy. 1. vyd., Moskva 1968.
- [33] VEJNIK, A, I.: Kokil. 1. vyd., Minsk 1972.
- [34] ANISOVIČ, G.A.: Vlijanije različnych faktorov na process zatverdevanija otlivki. In: Problemy teploobmena pri litje. Moskva 1960, s. 21 až 35.
- [35] NECHENDZI, J.A.: Stalnoje litje. 1. vyd. Moskva - Leningrad Metallurgizdat 1948.
- [36] GULJAJEV, B.B.: Litejnyje processy. 1. vyd., Moskva - Leningrad Mažgiz 1960.
- [37] COLLAUD, A.: Propriété de fonderie des alliages. Fondrie 271, 1968.
- [38] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 1. vyd., Praha 1974.

- [39] VETIŠKA, A.: K problematice kalorimetrického zjišťování tepelně - akumulčních vlastností formy. Slévárnictví XXII, 1974, č. 1, s. 13.
- [40] CARSLAW, H. W., JAEGER, J.C.: Conduction of heat in solids (Těploprovodnost tvrdých těl - překlad do ruského jazyka). 1. vyd., Moskva 1960.
- [41] LIGHTFOOT, M. H.: Fourth report of the committee on Heterogeneity of Steel ingots, Iron Steel Inst. Soec. rep. No 2, 1939, s. 162.
- [42] G.A.H. van den Oord.: Microstructural Modeling of Cast Iron Mechanical Properties, MT09.21, Master Thesis Eindhoven University of Technology.
- [43] L. de Groot.: Developing a microstructural material model for Compacted Graphite Iron, MT11.21, Bachelor Final Project Eindhoven University of Technology.
- [44] D.J.J. Dams.: From 3D microstructure to 2D unit cell model of a cast iron, MT11.31, Bachelor Final Project Eindhoven University of Technology.
- [45] SJÖGREN T.: Influences of the Graphite Phase on Elastic a Plastic Deformation Behaviour of Cast Irons, Linköping Studies in Science a Technology, ISBN 978-91-85715-52-7, ISSN 0345-7524
- [46] COLLINI L.: Micromechanical modeling of the elasto-plastic behavior of heterogeneous nodular cast iron, UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA.
- [47] William, Callister .D.: Materials science a engineering . s.l. : Department of metallurgicalengineering the university of Utah . ISBN-13 978-0-471-73696-7.
- [48] International, ASM. Gray Iron Castings, Casting, Vol 15, ASM Habook, ASM International, p 835–855. s.l. : ASM International, 2008.
- [49] M.R, Mitchell.: Effects of graphite morphology, matrix hardness, a structure on the fatigue resistance of gray cast iron. Detroit : Society of automotive engineers, 1975.
- [50] R.C, Voigt a S.D, Holmgren.: Crack initiation a Propagation in Gray a Compacted Graphite (CG) Cast Irons. Kansas;Minnesota : AFS Transactions, vol. 98, 1990.

- [51] Fredriksson, H., Sunnerkrantz, P.-A. a Ljubinković, P. Relationship between structure a thermal fatigue in cast iron. s.l. : Maney publishing, 1988.
- [52] Zieher F.: Advanced Thermal Mechanical Fatigue Life Simulation of Cylinder Heads, AVL List GmbH, Graz, Austria, 2004 ABAQUS Users' Conference.
- [53] Zieher F.: Thermal mechanical fatigue simulation of cast iron cylinder heads, AVL List GmbH, Graz, Austria, April 12, 2005, SAE 2005 World Congress.
- [54] HAVLÍČEK, F.: Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy. Ostrava, VŠB, 1970.
- [55] Ho-Mun Si, Si-Young Kwahk: A hybrid method for casting proces simulation by combining FDM a FEM with an efficient data conversion algorithm. Journal of Materials Processing Technology 133 (2003) 311-321.
- [56] HAVLÍČEK, F.: Tepelně-fyzikální pochody mezi ingotem a kokilou. [Hutnické aktuality], roč. 10, č. 1, VÚHŽ Praha 1969.
- [57] PŘIBYL, J.: Řízené tuhnutí ocelových odlitků. 1. vyd., Praha 1986.

Příloha

Příloha 1

Použité tepelné a fyzikální vlastnosti pro hliník (Al).

Materiál	Hliník Al
Teplota Likvidu [°C]	670
Teplota Solidu [°C]	660
Eutektické teplo [°C]	665
Latentní krystalizační teplo [J/kg]	397016,3

Tepelná vodivost	
λ [W/mK]	Teplota [°C]
186,10	28
188,86	100
191,36	200
193,29	320
194,86	470
196,14	660
86,88	670
92,45	800

Specifické teplo	
C_p [J/kgK]	Teplota [°C]
905,54	38
929,58	78
932,45	80
935,45	90
950,21	120
1093,90	450
1109,90	480
1134,60	520
1179,20	580
1242,70	650
1176,67	660
1176,67	670
1176,67	800

Hustota	
ρ [kg/m ³]	Teplota [°C]
2698,52	28
2688,69	80
2635,60	330
2551,80	660
2387,27	670
2350,87	800

Dynamická viskozita	
η [m ² /s]	Teplota [°C]
1,22E-03	670
1,15E-03	700
1,04E-03	750
9,47E-04	800

pokračování Příloha 1

Použité tepelné a fyzikální vlastnosti pro zinek (Zn).

Materiál	Zinek Zn
Teplota Likvidu [°C]	419,45
Teplota Solidu [°C]	417,45
Eutektické teplo [°C]	418,45
Latentní krystalizační teplo [J/kg]	113000

Tepelná vodivost	
λ [W/mK]	Teplota [°C]
121,00	26,85
100,00	418,85
49,50	419,85
73,00	826,85

Hustota	
ρ [kg/m ³]	Teplota [°C]
7140,00	24,5
6750,00	417,45
6748,00	419,45
6400,00	726,85

Specifické teplo	
C_p [J/kgK]	Teplota [°C]
390	26,85
400	126,85
420	226,85
430	326,85
480	417,45
480	418,45
480	419,45

Dynamická viskozita	
η [m ² /s]	Teplota [°C]
100,00	670
5,20	700

pokračování Příloha 1

Použité tepelné a fyzikální vlastnosti pro slitinu hliníku (AlSi12).

Materiál	AlSi12
Teplota Likvidu [°C]	562
Teplota Solidu [°C]	495
Latentní krystalizační teplo [J/kg]	509000

Tepelná vodivost	
λ [W/mK]	Teplota [°C]
134	1
136	100
138	150
144	250
146	350
144	400
134	492
77	577
80	800
80	2000

Specifické teplo	
C_p [J/kgK]	Teplota [°C]
867	1
860	50
906	100
957	200
989	300
1047	400
1174	495
1180	562
1180	2000

Hustota	
ρ [kg/m ³]	Teplota [°C]
2700	1
2668	200
2621	495
2615	510
2610	520
2600	530
2500	540
2529	562
2165	200

Dynamiccká viskozita	
η [m ² /s]	Teplota [°C]
1000	1
1000	495
0,01	511
4,90E-07	562
3,46E-07	2000

pokračování Příloha 1

Použité tepelné a fyzikální vlastnosti pro X38CrMoV5.1 (19 552).

Materiál	X38CrMoV5.1
Teplota Likvidu	1464
Teplota Solidu	1360
Latentní krystalizační teplo	262070

Tepelná vodivost	
λ [W/mK]	Teplota [°C]
25	1
26	100
27	200
27,4	300
27,3	400
26,8	500
26,4	600
26,2	700
26,3	800
26,8	900
27,7	1000
28,9	1100
30,3	1200
31,8	1300
33,4	1360
30	1464
30	2000

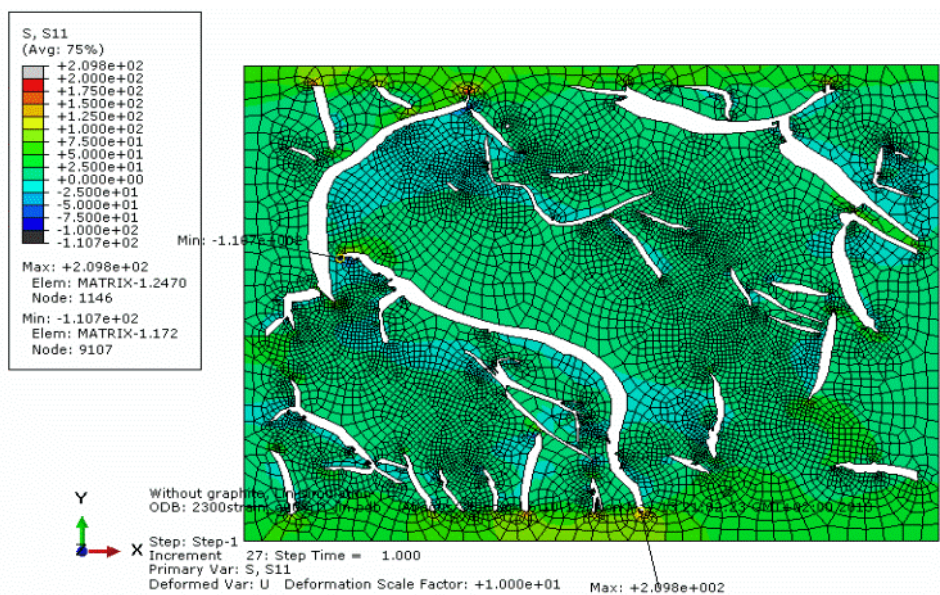
Chemické složení [%]	
C	Si
0,38	1,00
Cr	Mo
5,00	1,00
Mn	P
0,40	0,03
V	S
0,50	0,03

Hustota	
ρ [kg/m ³]	Teplota [°C]
7740	1
7720	100
7700	200
7670	300
7630	400
7600	500
7570	600
7540	700
7520	800
7530	900
7480	1000
7420	1100
7360	1200
7250	1360
7000	1464
6673	2000

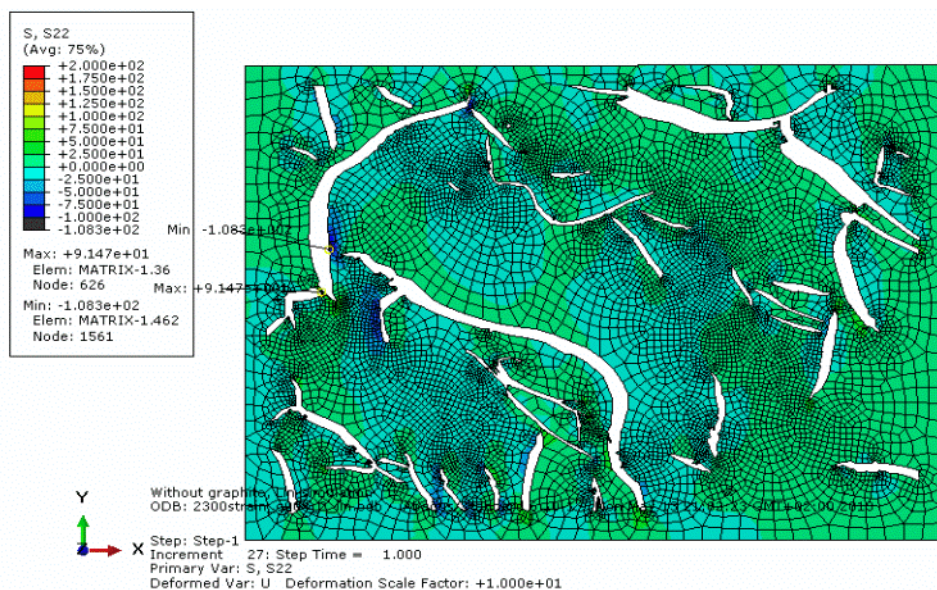
Specifické teplo	
C_p [J/kgK]	Teplota [°C]
461	1
496	100
533	200
568	300
611	400
677	500
778	600
1400	700
740	800
620	900
620	1000
630	1100
650	1200
665	1300
750	2000

Příloha 2

Vizualizace výsledků pro vzorek 1 (2300strain_q004) - Lineární simulace Dutiny (Bez grafitu)

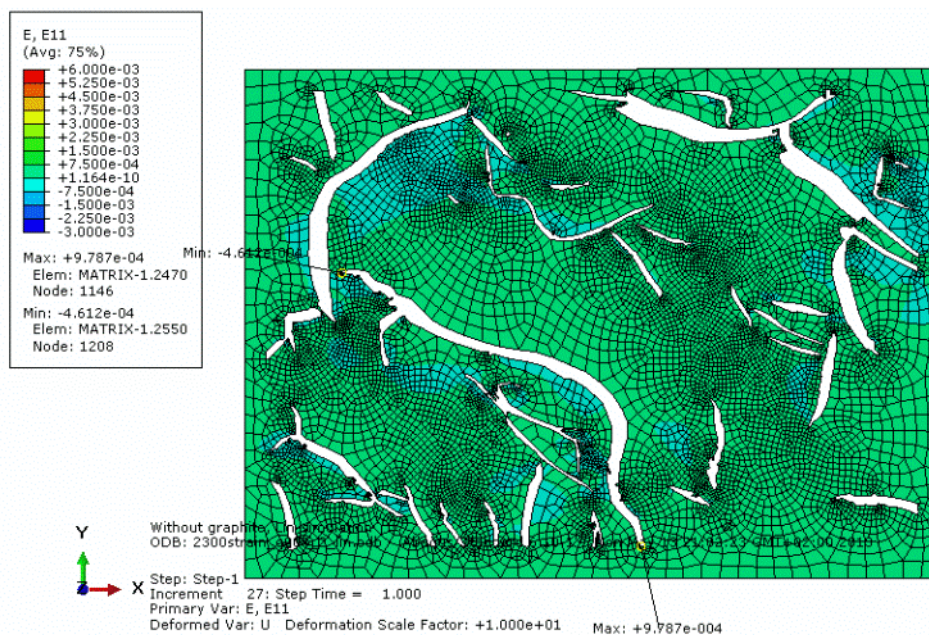


Obr. 1.8: Tah-S11-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

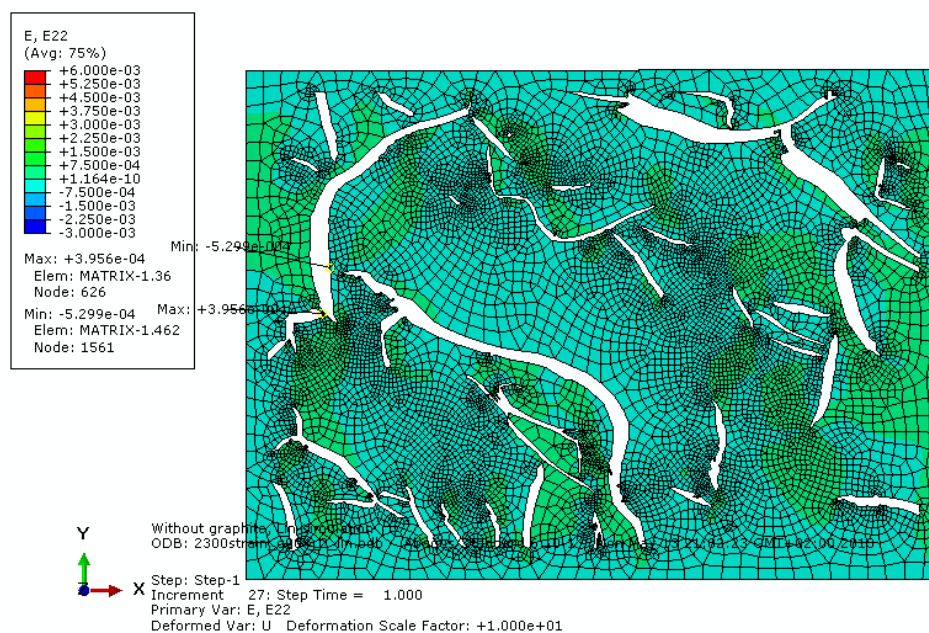


Obr. 1.9: Tah-S22-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 1.8 a 1.9 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro lineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).



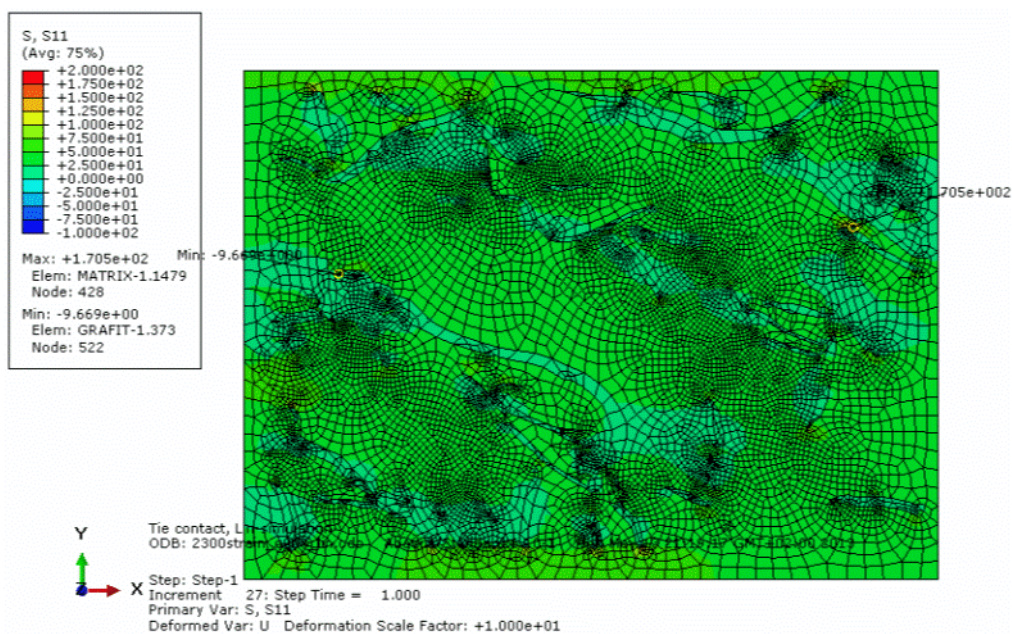
Obr. 2.0: Tlak-E11-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)



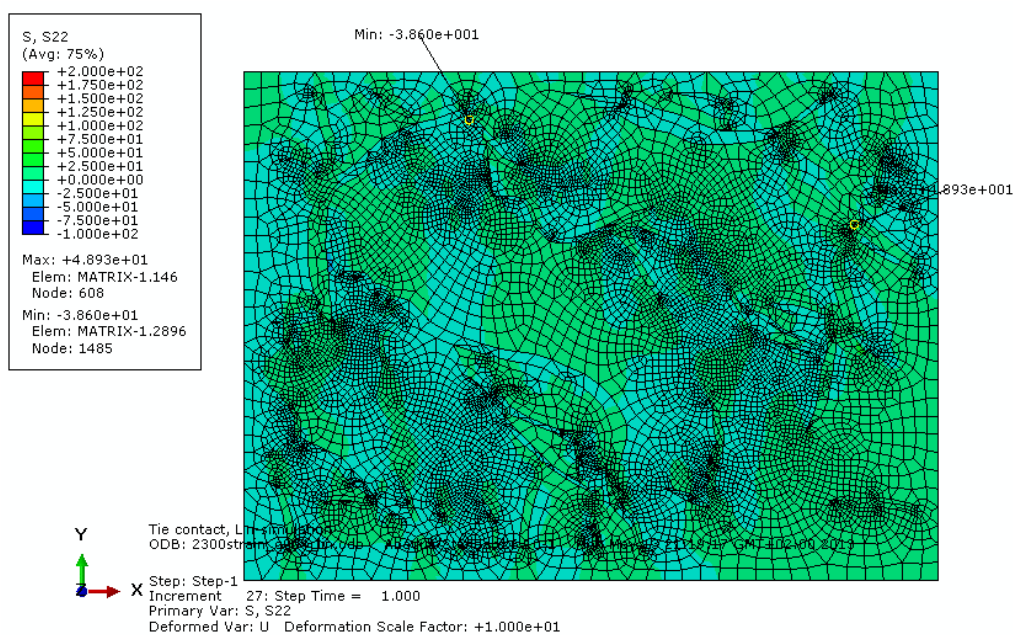
Obr. 2.1: Tlak-E22-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 2.0 a 2.1 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro lineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).

Vázaný kontakt

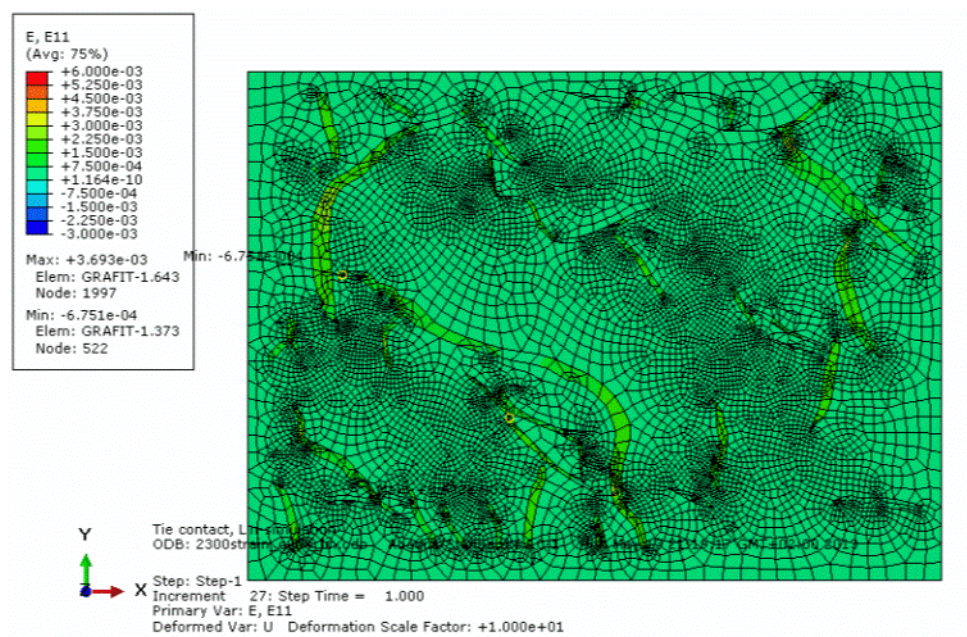


Obr. 2.2: Tah-S11-lineární simulace - „Vázaný kontakt“

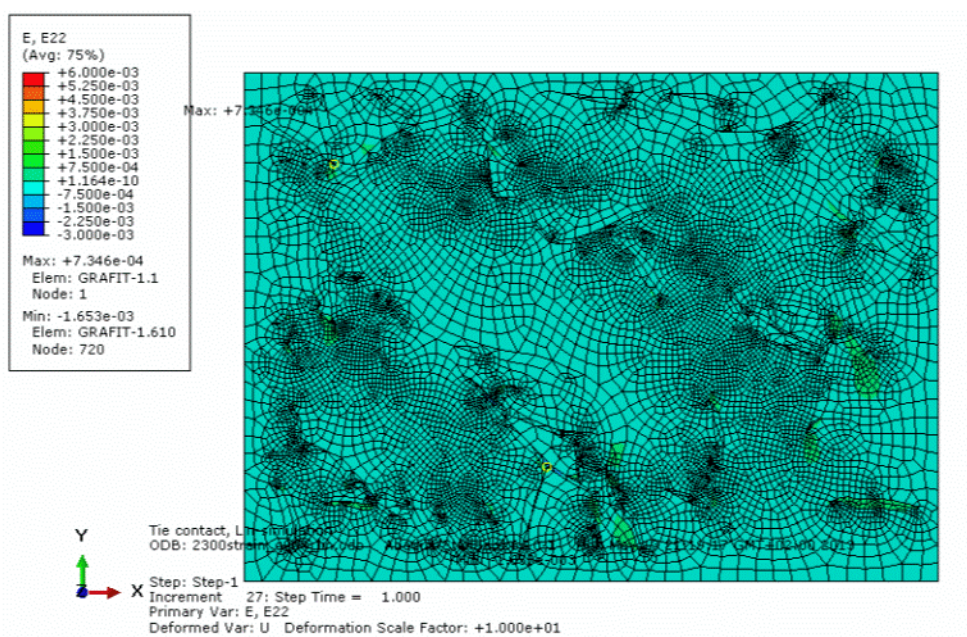


Obr. 2.3: Tah-S22-lineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 2.2 a 2.3 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro lineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.



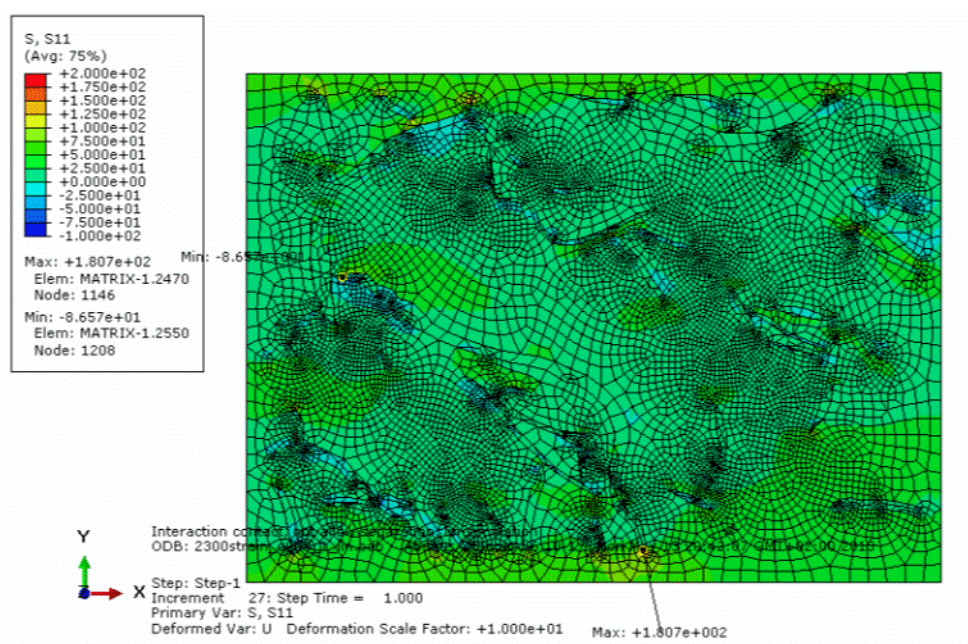
Obr. 2.4: Tlak-E11-lineární simulace - „Vázaný kontakt“



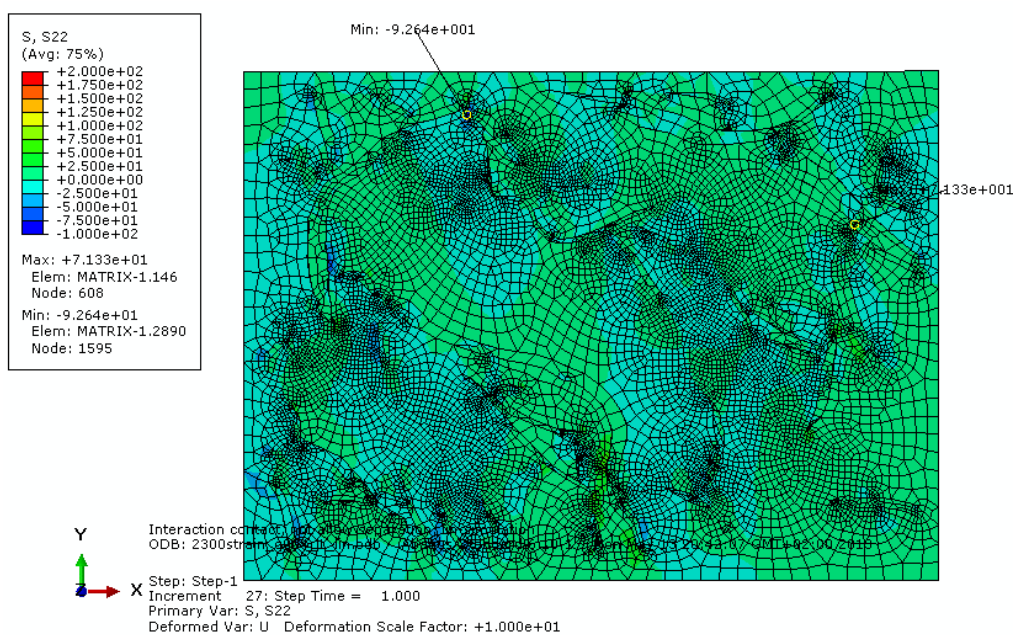
Obr. 2.5: Tlak-E22-lineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 2.4 a 2.5 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro lineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.

Vzájemně působící kontakt

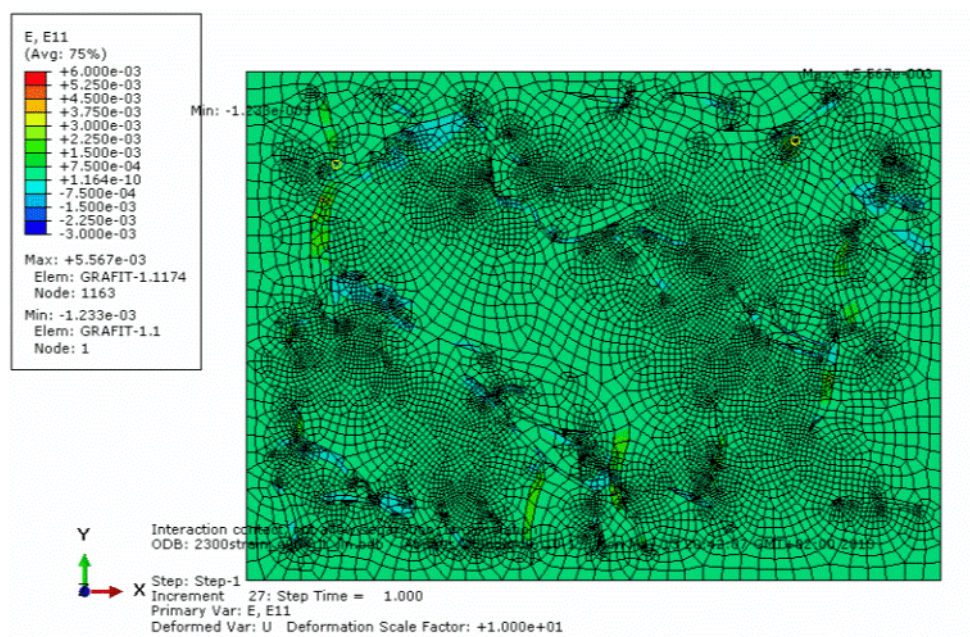


Obr. 2.6: Tah-S11-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

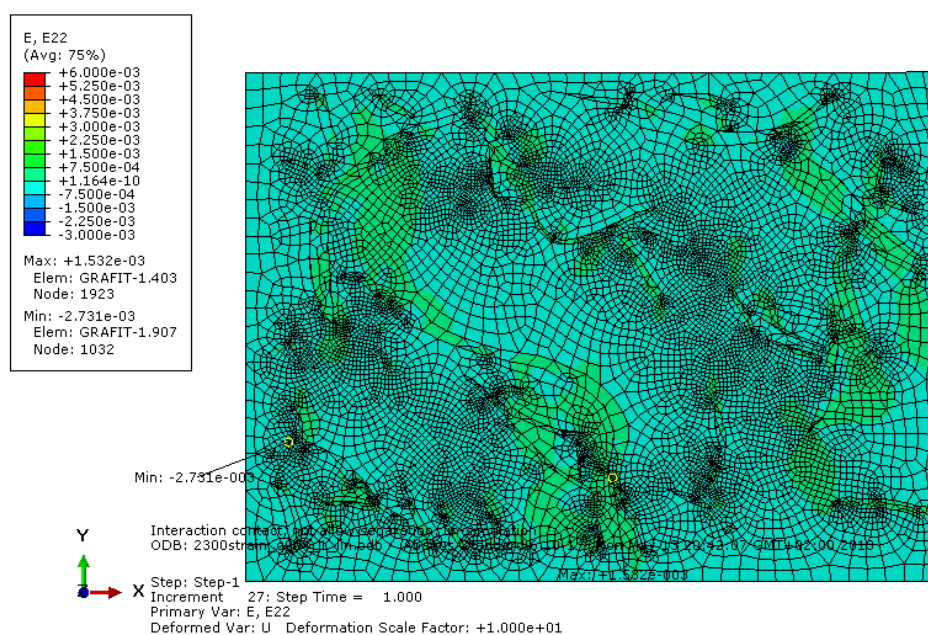


Obr. 2.6: Tah-S22-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

Na obrázcích 2.5 a 2.6 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro lineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.



Obr. 2.7: Tlak-E11-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

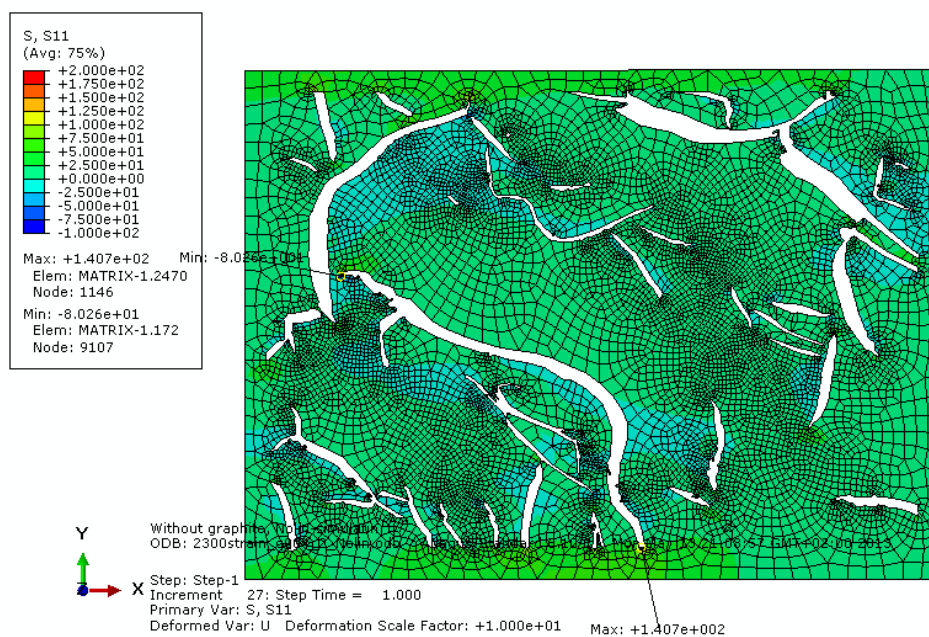


Obr. 2.8: Tlak-E22-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

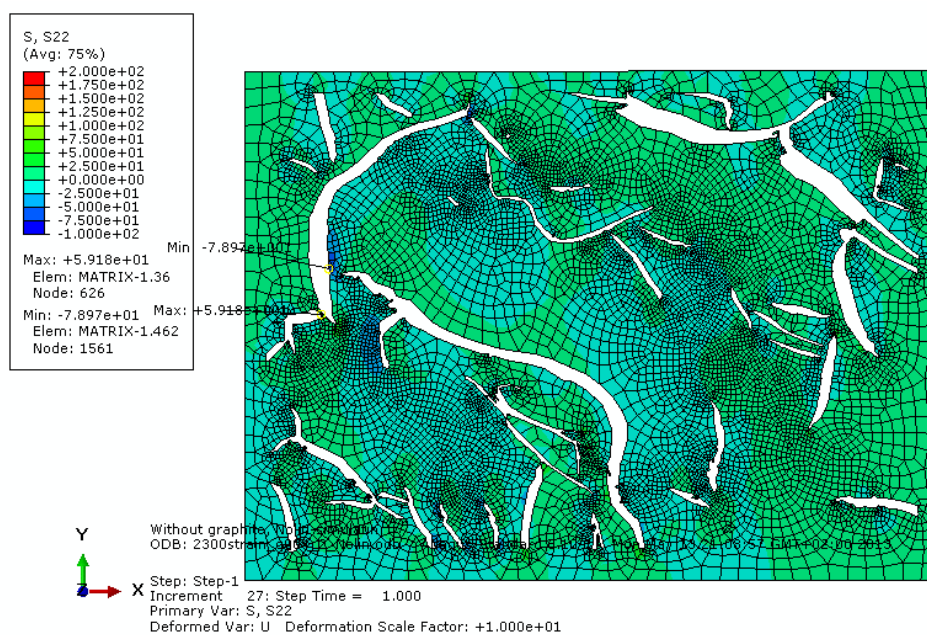
Na obrázcích 2.7 a 2.8 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro lineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.

Vizualizace výsledků u vzorku 1 (2300strain_q004) - Nelineární simulace

Dutiny (Bez grafitu)

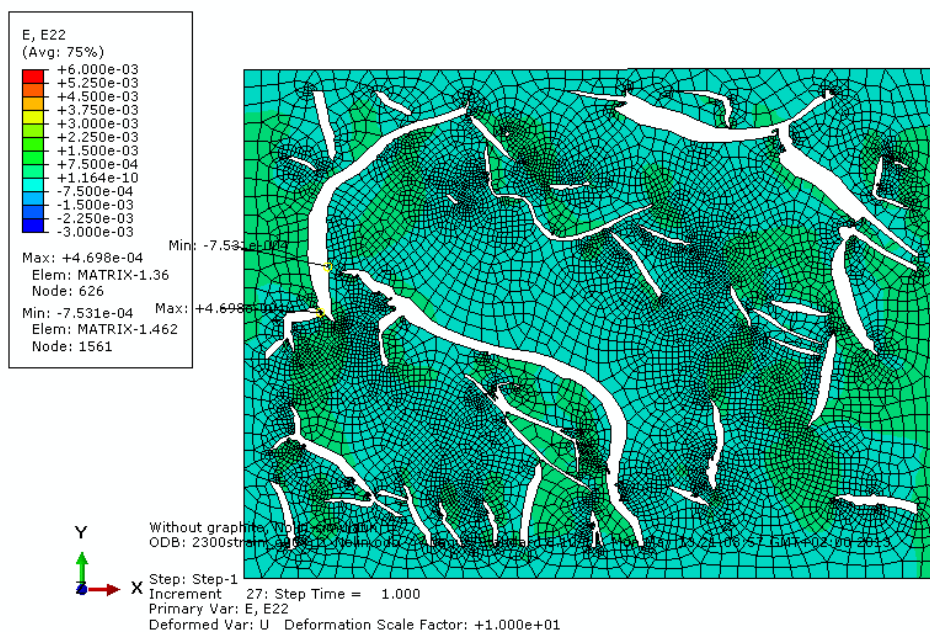


Obr. 2.9: Tah-S11-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

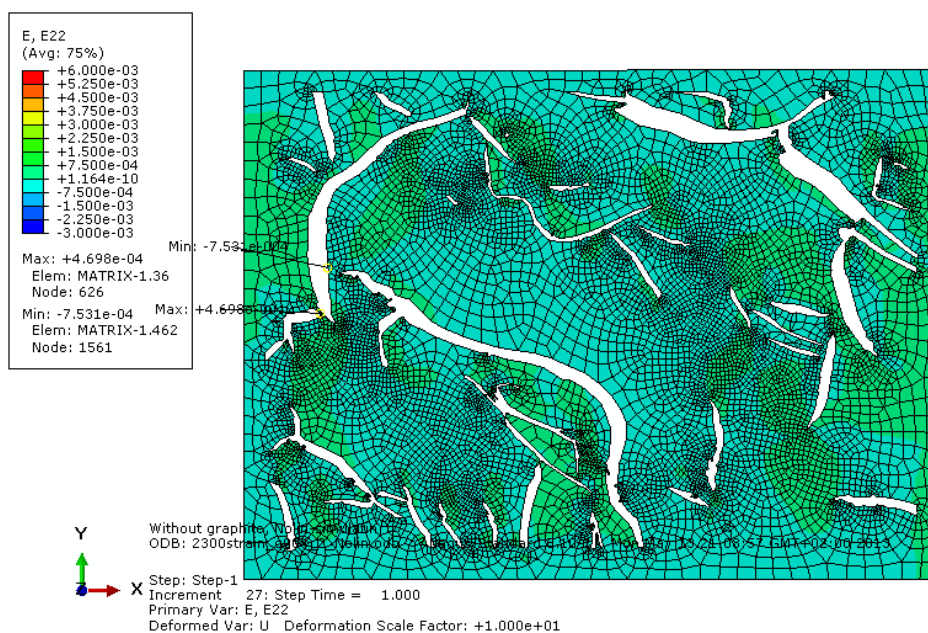


Obr. 3.0: Tah-S22-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 2.9 a 3.0 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro nelineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).



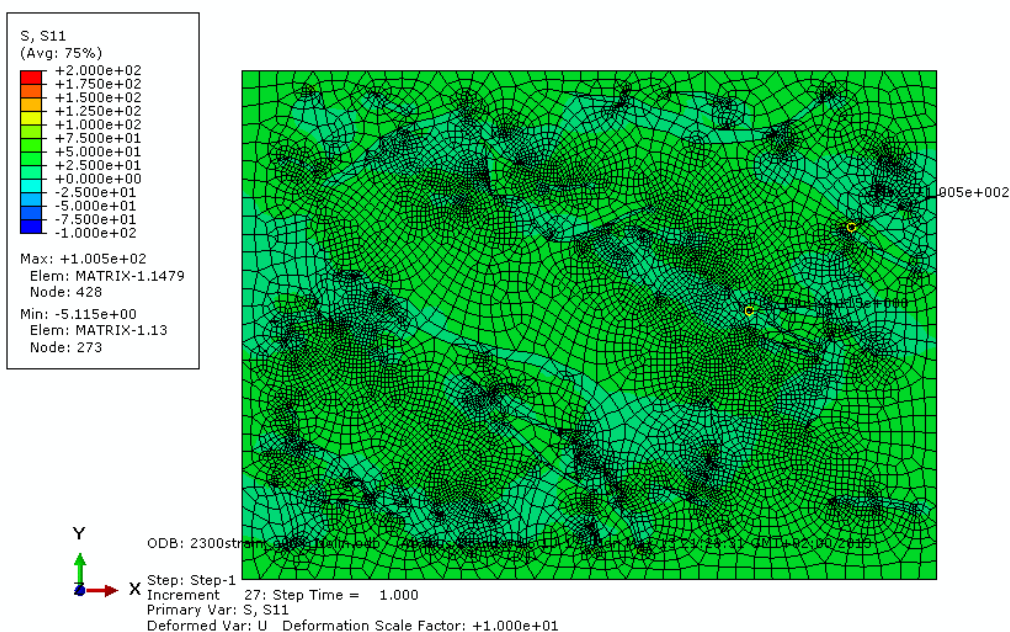
Obr. 3.1: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)



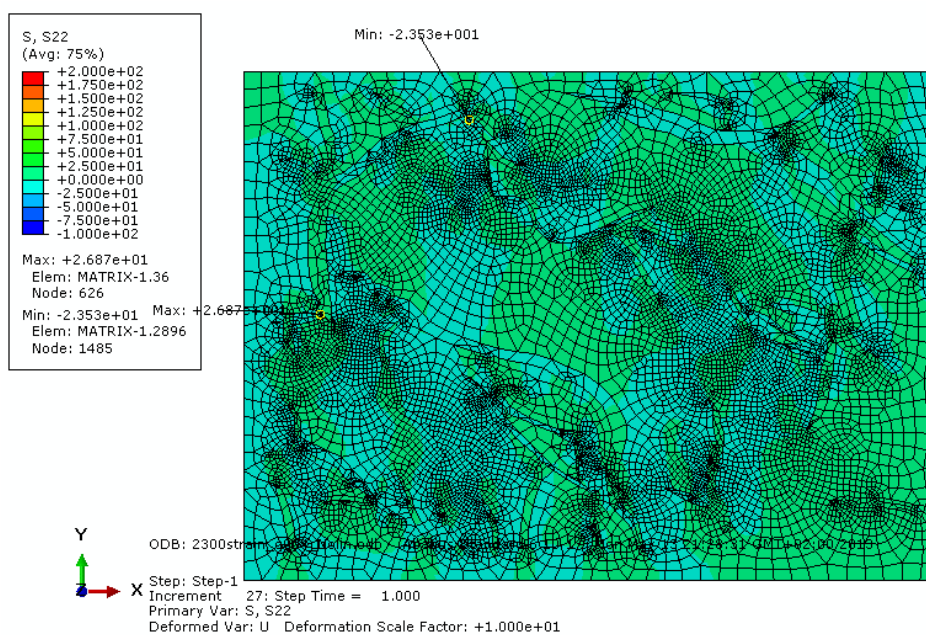
Obr. 3.2: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 3.1 a 3.2 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro nelineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).

Vázaný kontakt

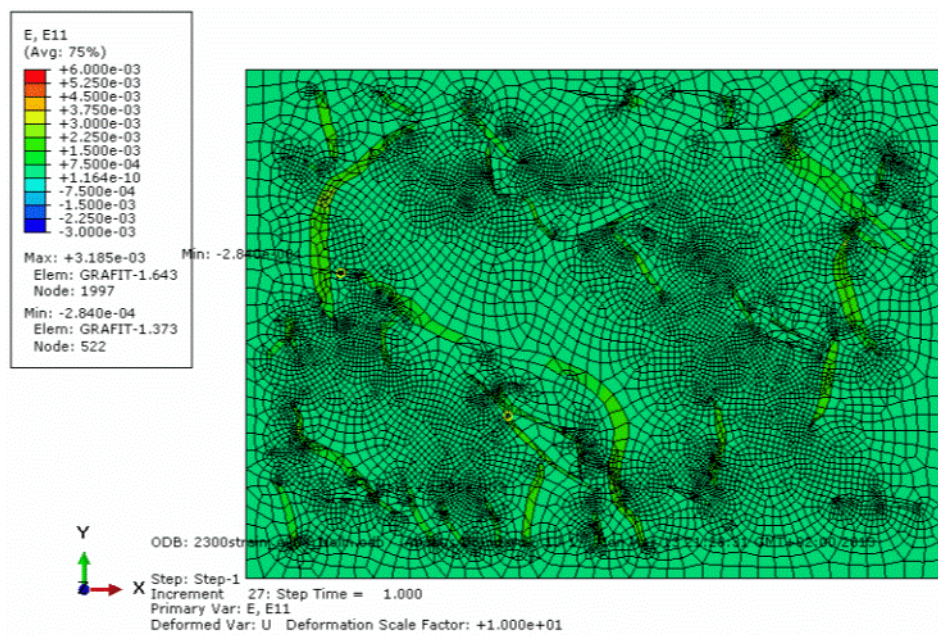


Obr. 3.3: Tah-S11-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

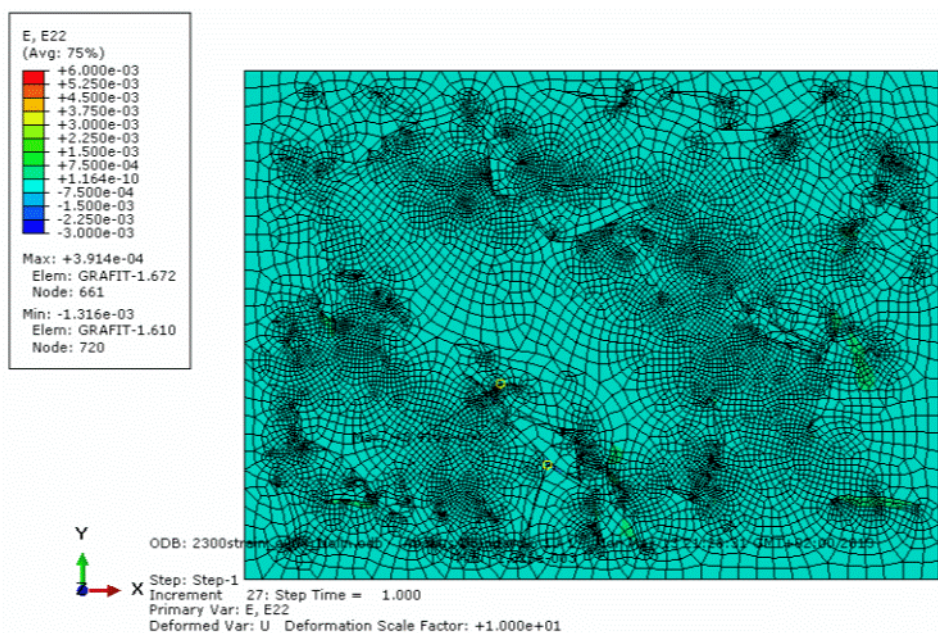


Obr. 3.4: Tah-S22-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 3.3 a 3.4 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro nelineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.



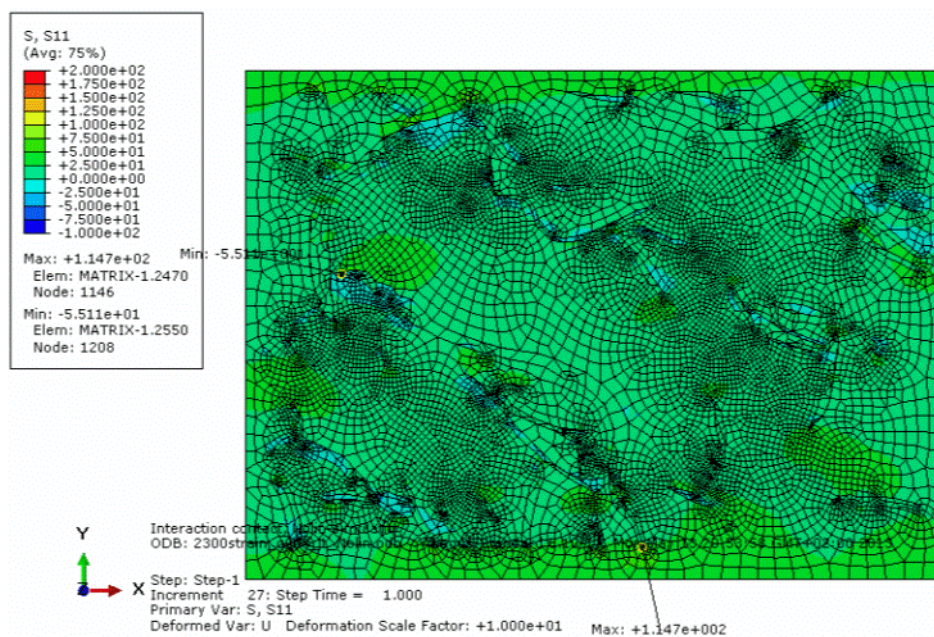
Obr. 3.5: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“



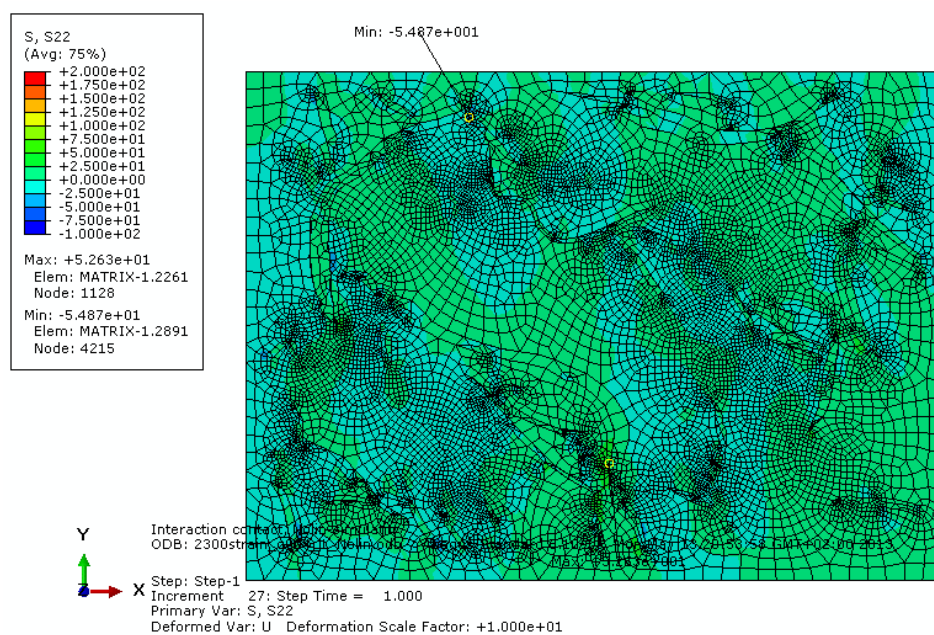
Obr. 3.6: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 3.5 a 3.6 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro nelineární simulaci s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.

Vzájemně působící kontakt

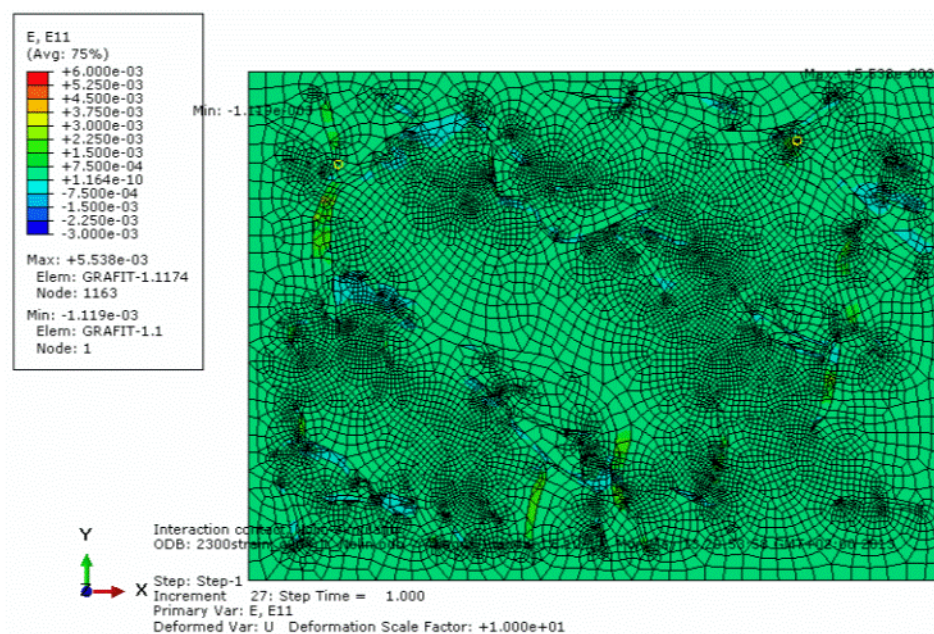


Obr. 3.7: Tah-S11-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

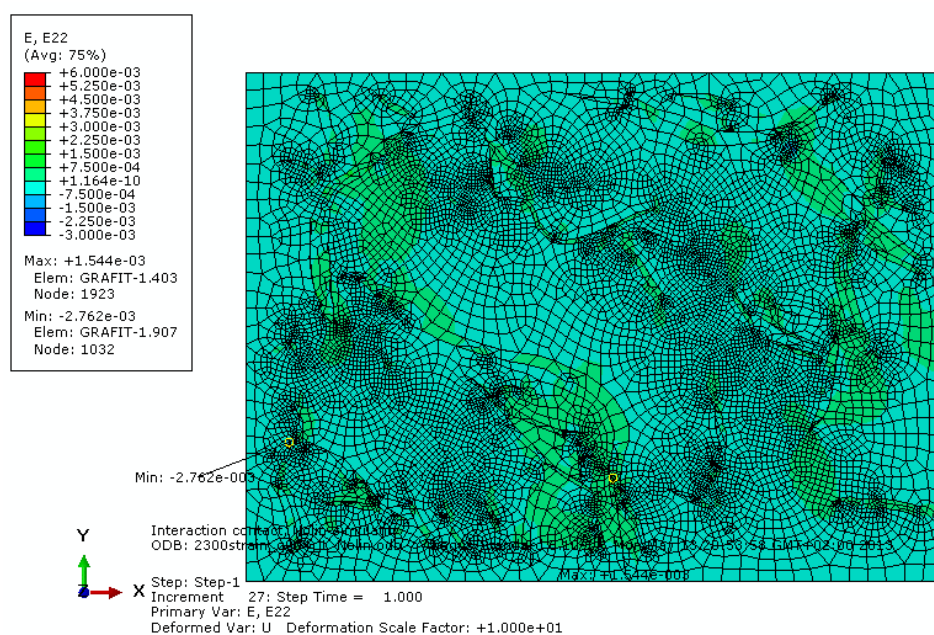


Obr. 3.8: Tah-S22-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

Na obrázcích 3.7 a 3.8 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) for Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.



Obr. 3.9: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

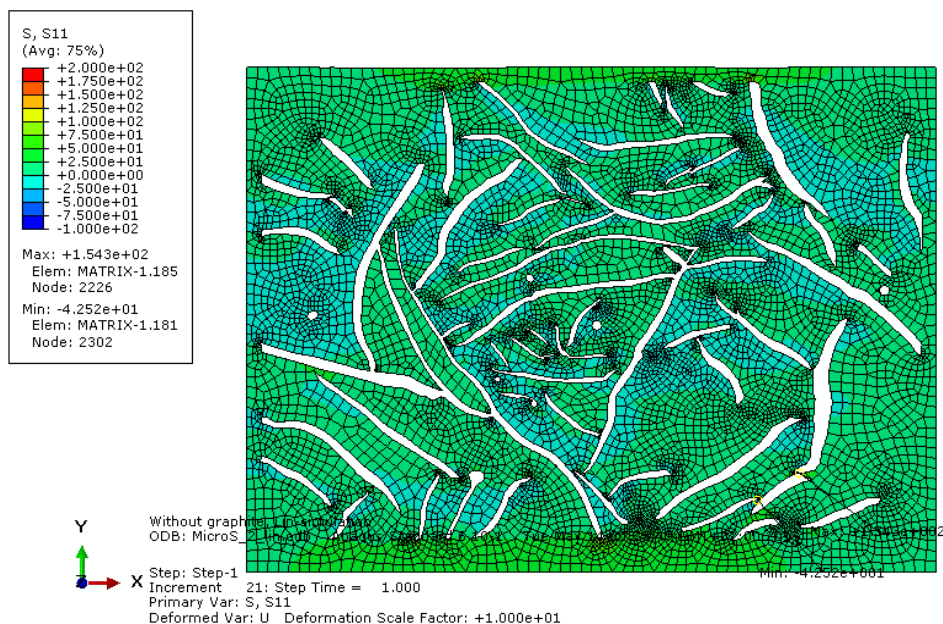


Obr. 4.0: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

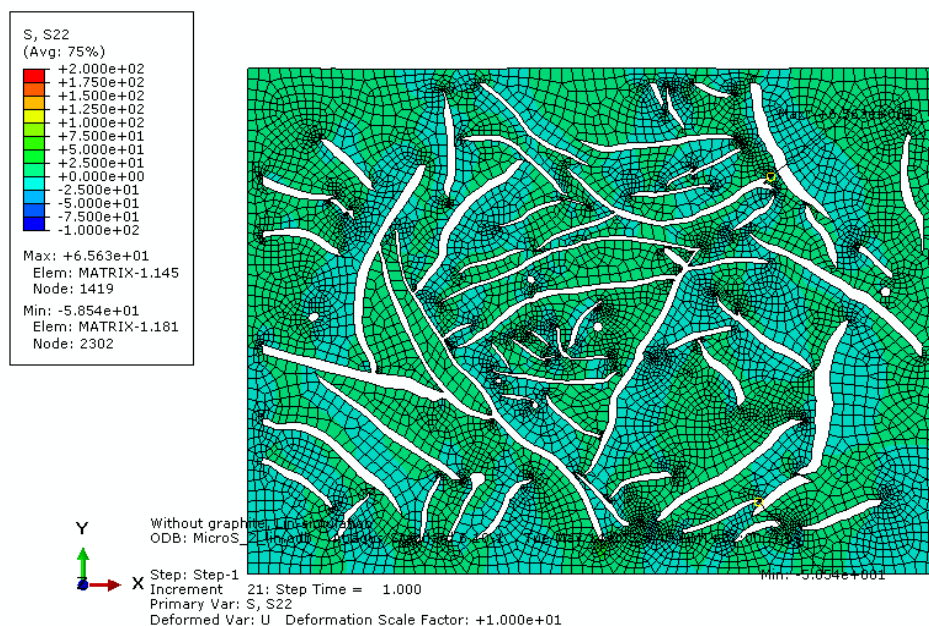
Na obrázcích 3.9 a 4.0 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech S11(X) a S22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.

Vizualizace výsledků u vzorku 2 (MicroS) - Lineární simulace

Dutiny (Bez grafitu)

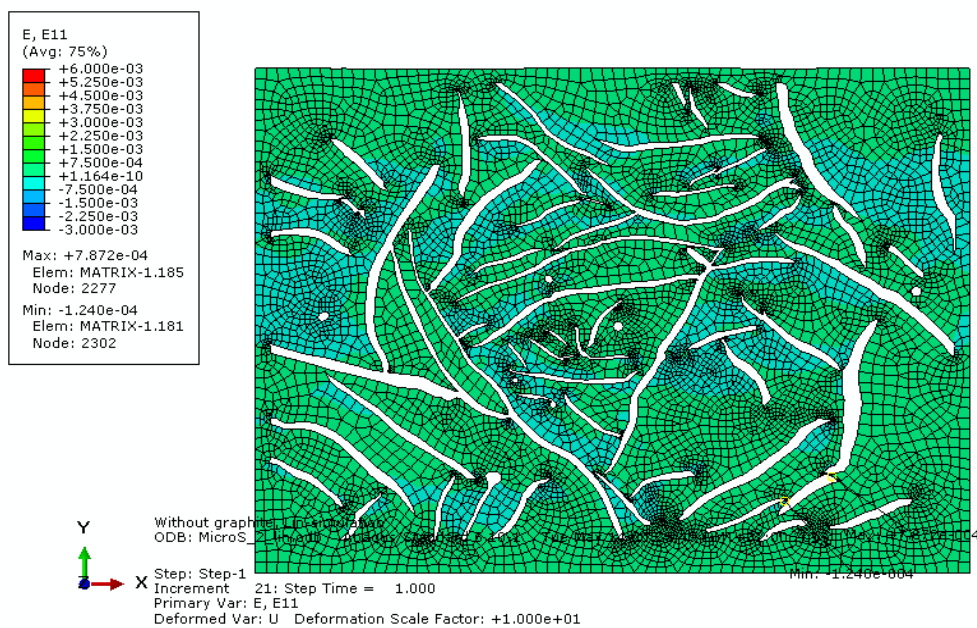


Obr. 4.1: Tah-S11-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

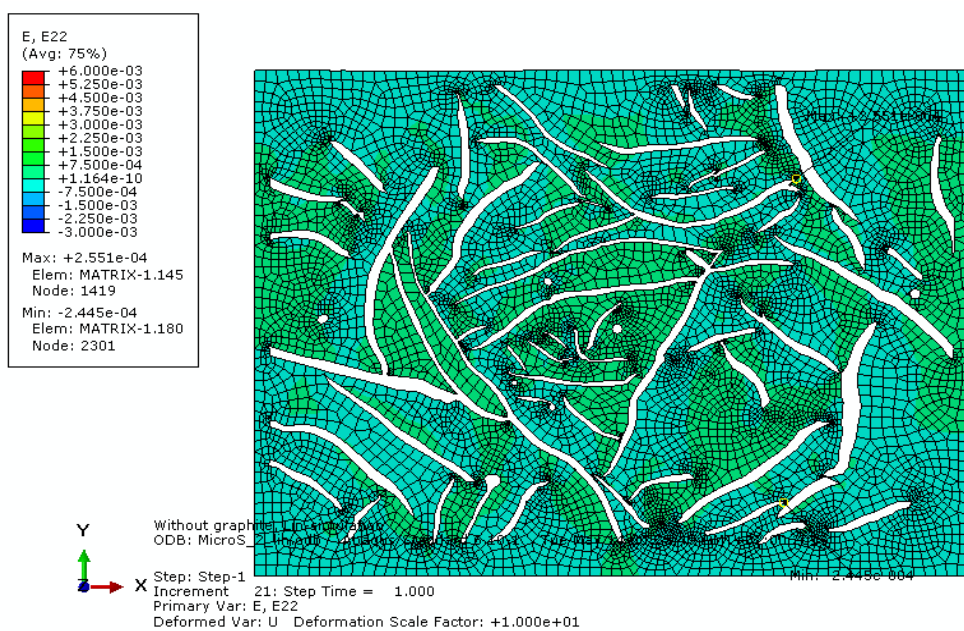


Obr. 4.2: Tah-S22-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 4.1 a 4.2 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro lineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).



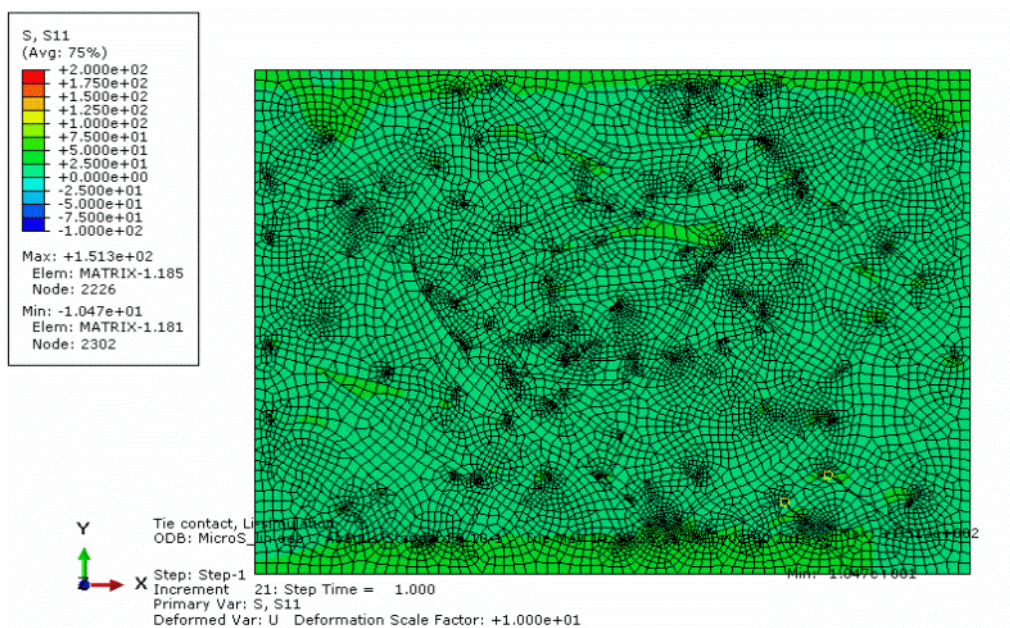
Obr. 4.3: Tlak-E11-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)



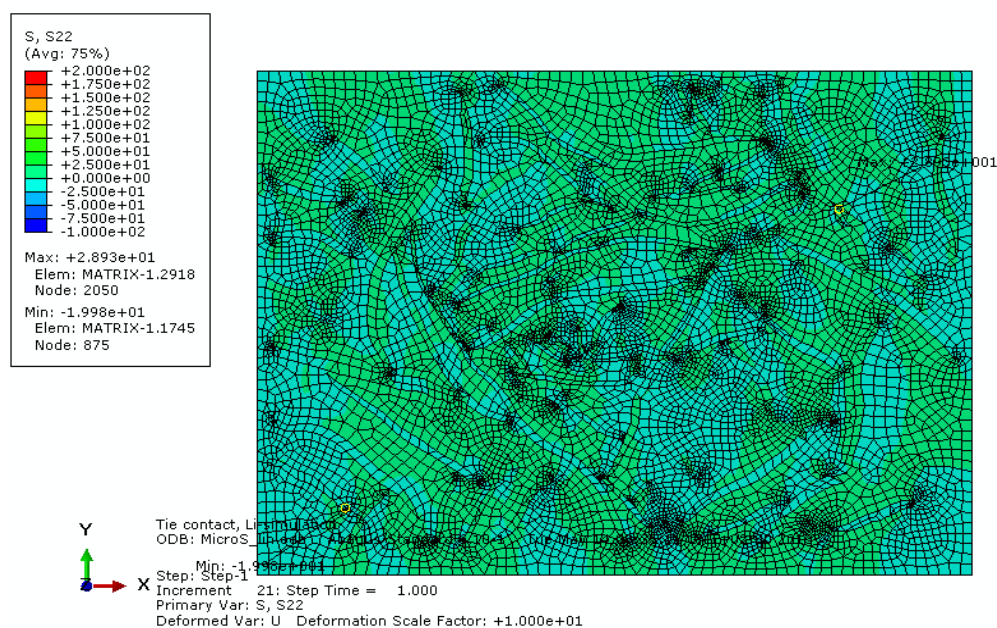
Obr. 4.4: Tlak-E22-lineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 4.3 a 4.4 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro lineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).

Vázaný kontakt

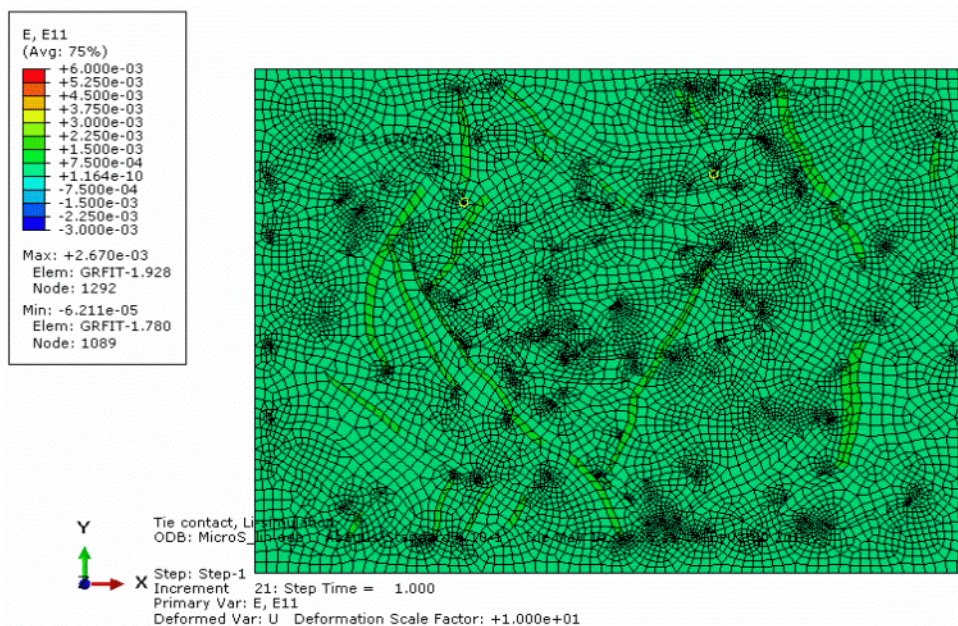


Obr. 4.5: Tah-S11-lineární simulace - „Vázaný kontakt“

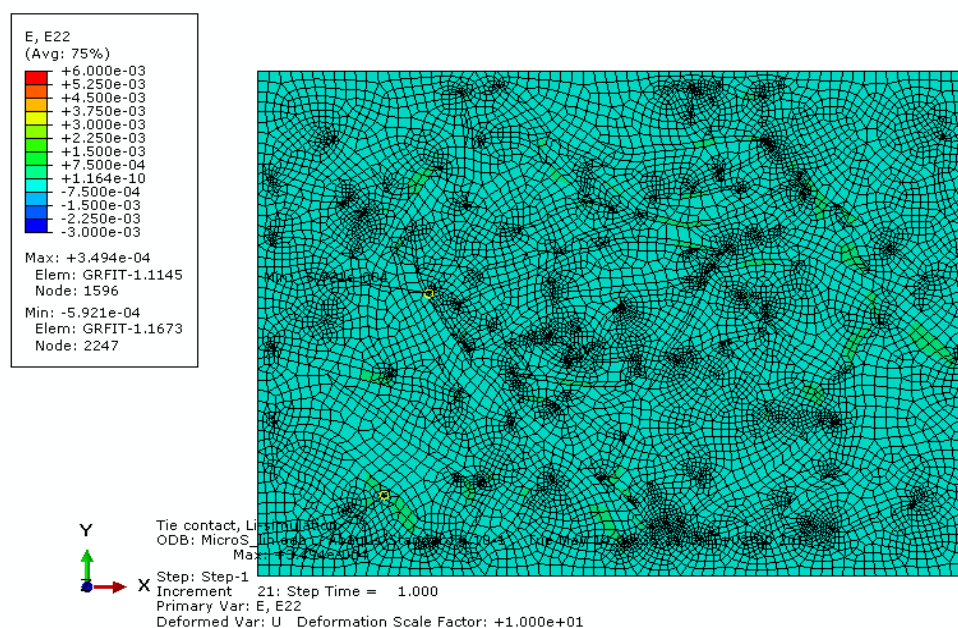


Obr. 4.6: Tah-S22-lineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 4.5 a 4.6 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro lineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.



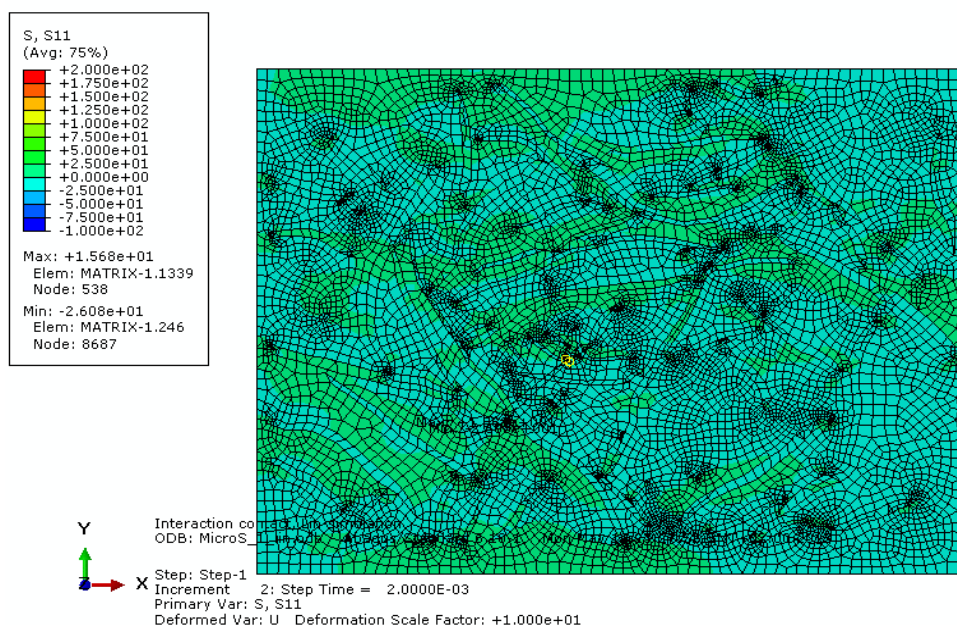
Obr. 4.7: Tlak-E11-lineární simulace - „Vázaný kontakt“



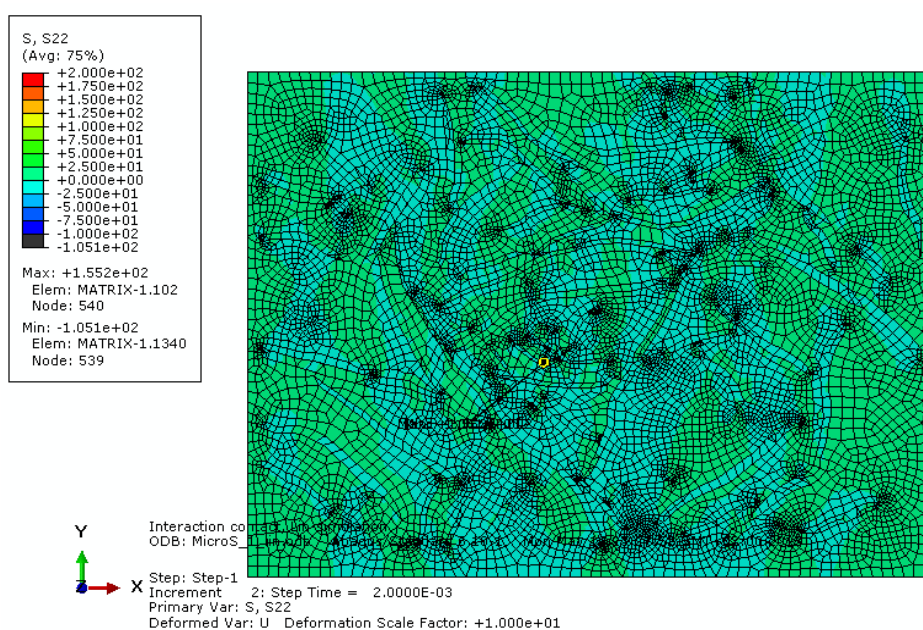
Obr. 4.8: Tlak-E22-lineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 4.7 a 4.8 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro lineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.

Vzájemně působící kontakt

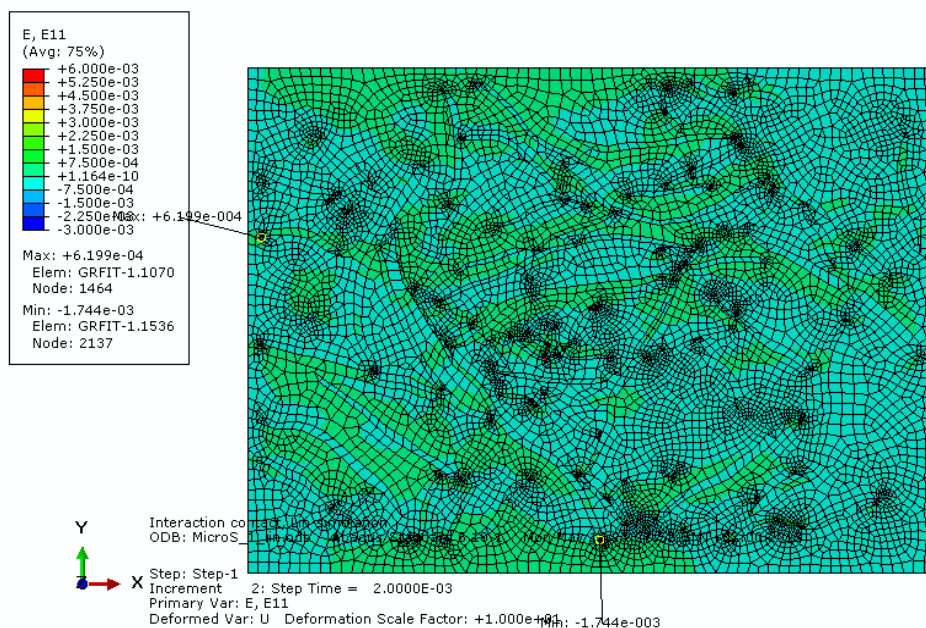


Obr. 4.9: Tah-S11-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

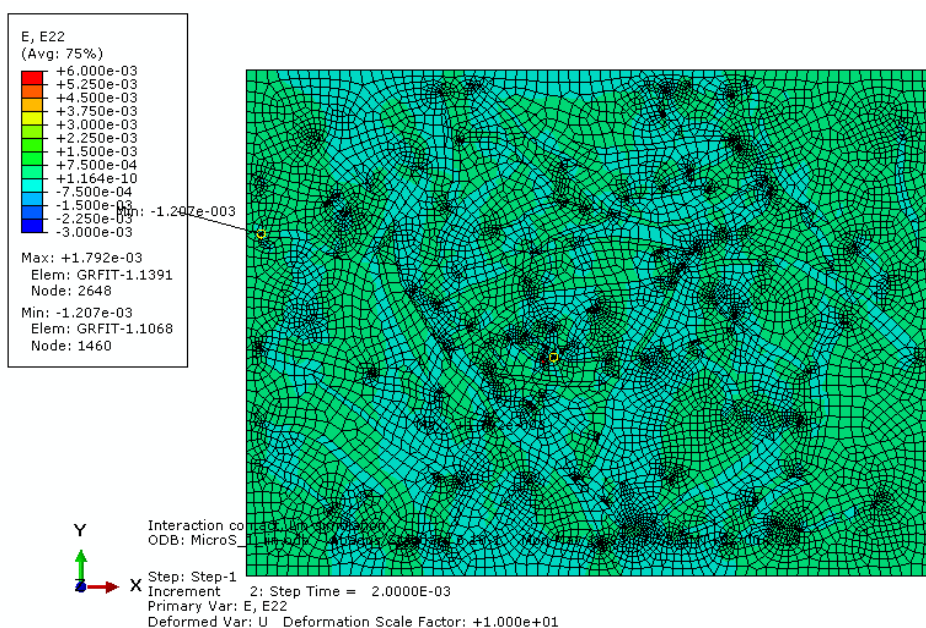


Obr. 5.0: Tah-S22-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

Na obrázcích 4.9 a 5.0 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro lineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.



Obr. 5.1: Tlak-E11-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

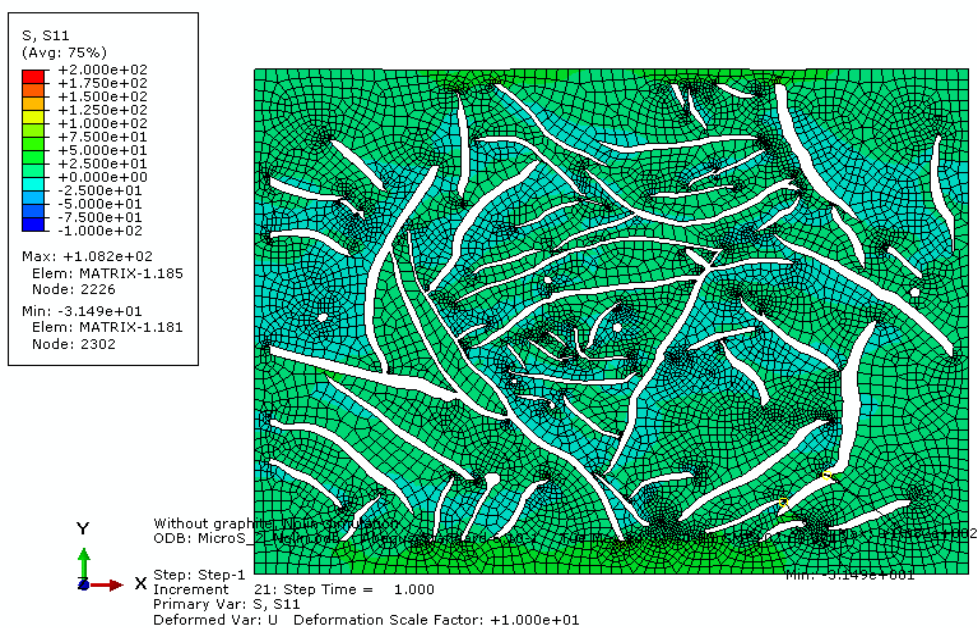


Obr. 5.2: Tlak-E22-lineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

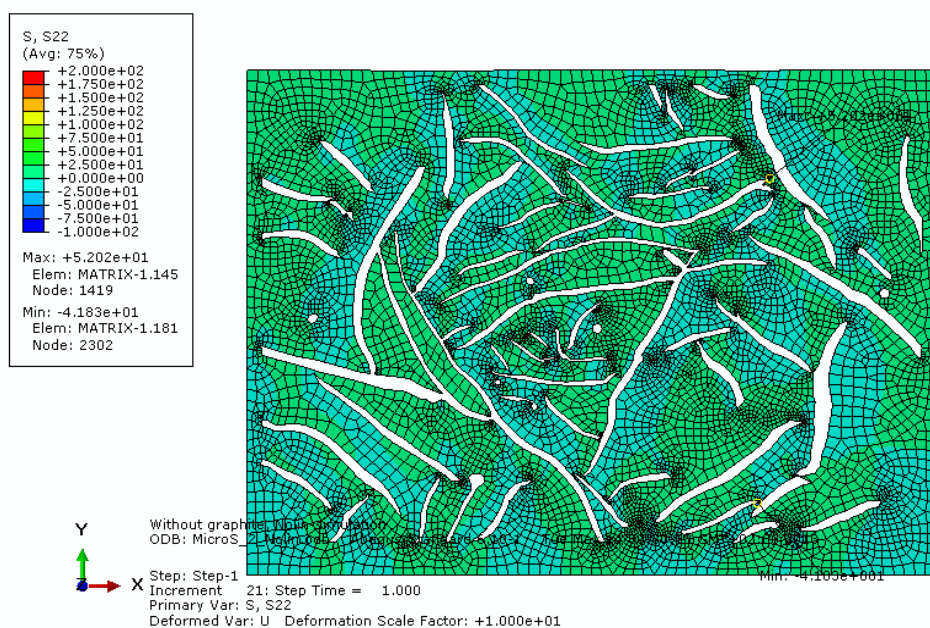
Na obrázcích 5.1 a 5.2 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro lineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.

Vizualizace výsledků u vzorku 2 (MicroS) - Nelineární simulace

Dutiny (Bez grafitu)

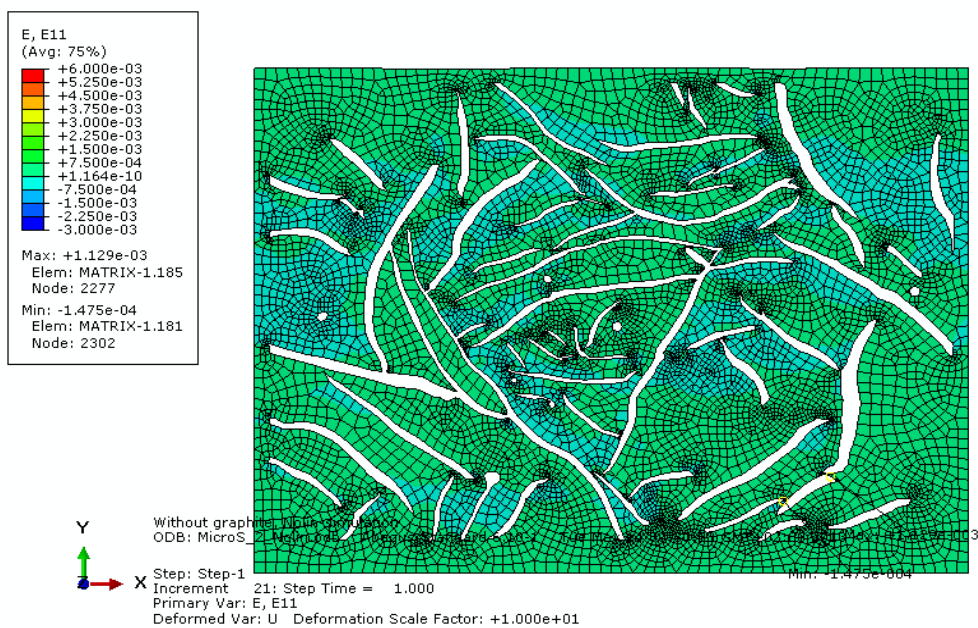


Obr. 5.3: Tah-S11-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

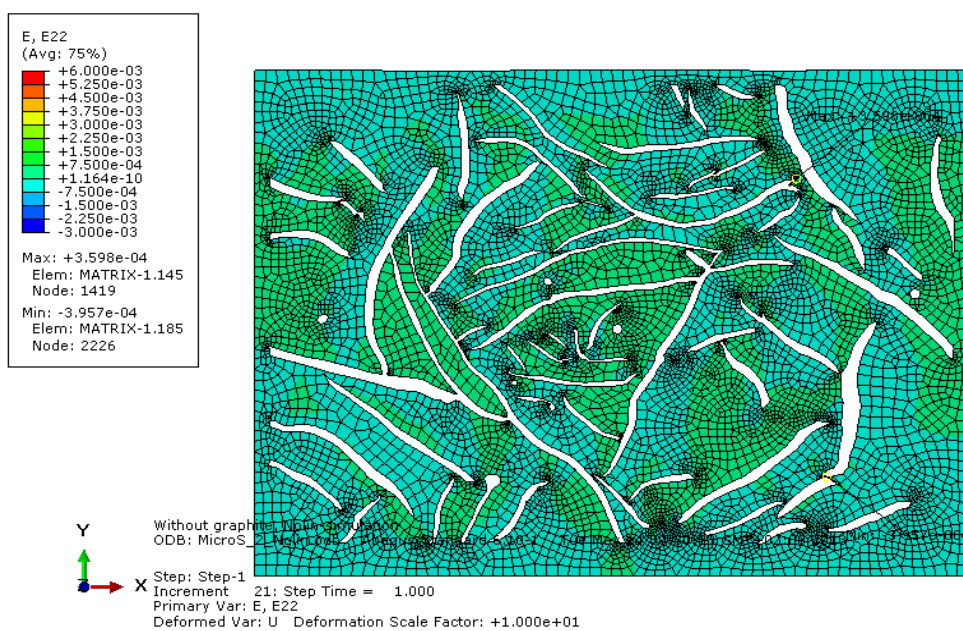


Obr. 5.4: Tah-S22-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 5.3 a 5.4 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).



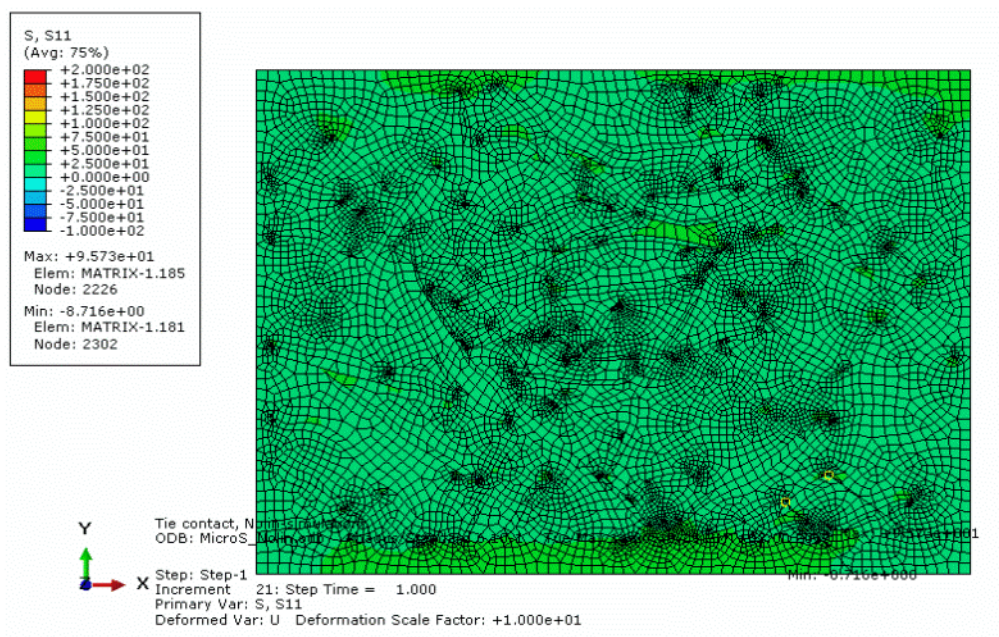
Obr. 5.5: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)



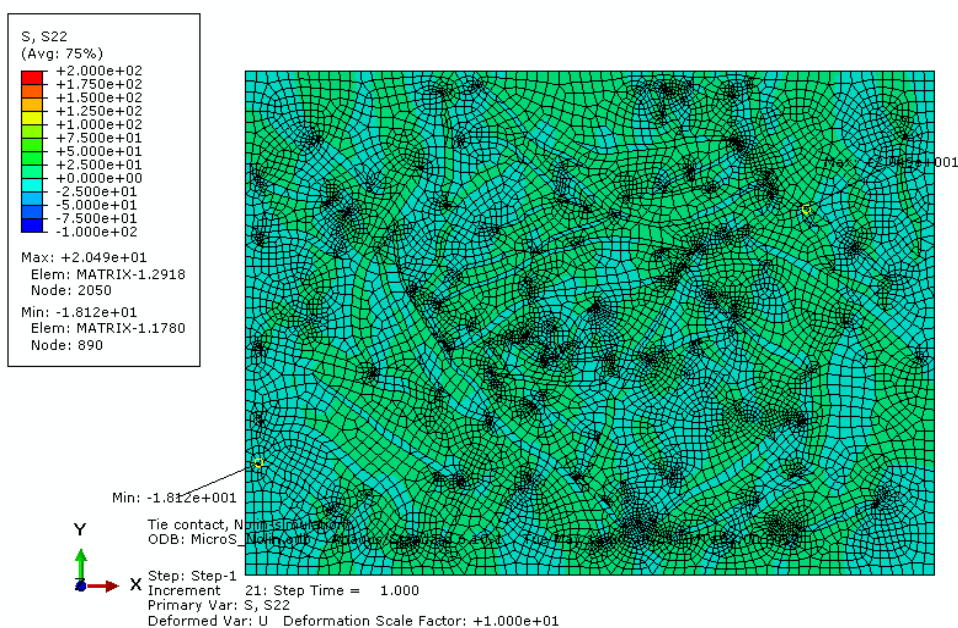
Obr. 5.6: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 5.5 a 5.6 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).

Vázaný kontakt

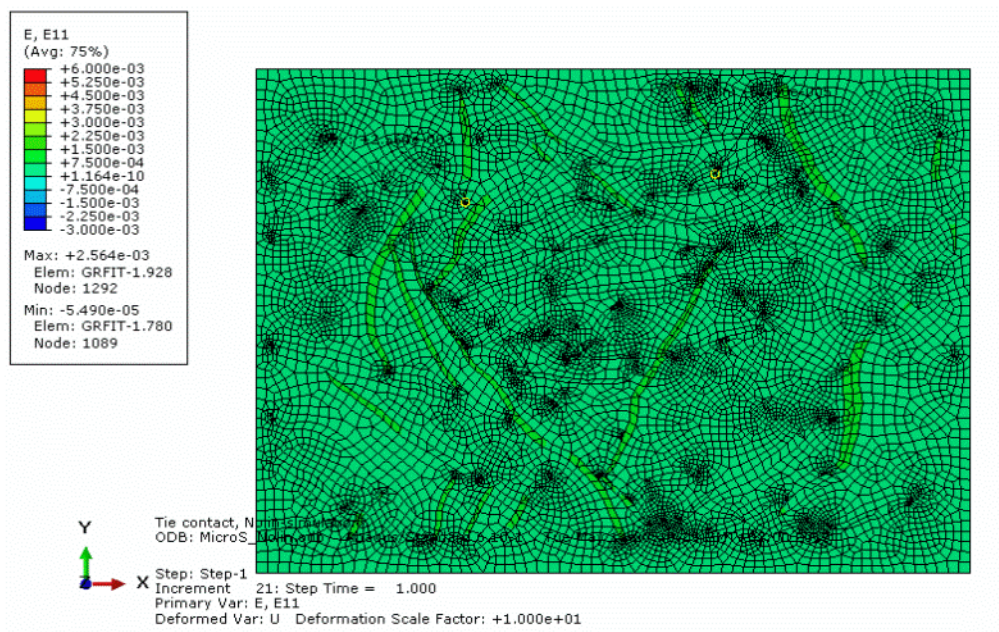


Obr. 5.7: Tah-S11-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

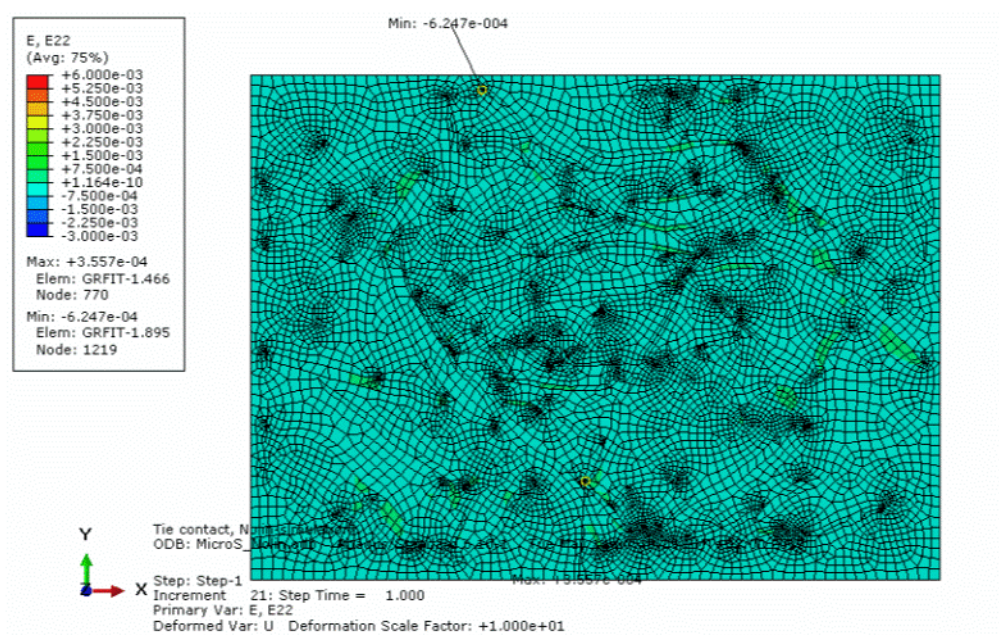


Obr. 5.8: Tah-S22-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 5.7 a 5.8 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.



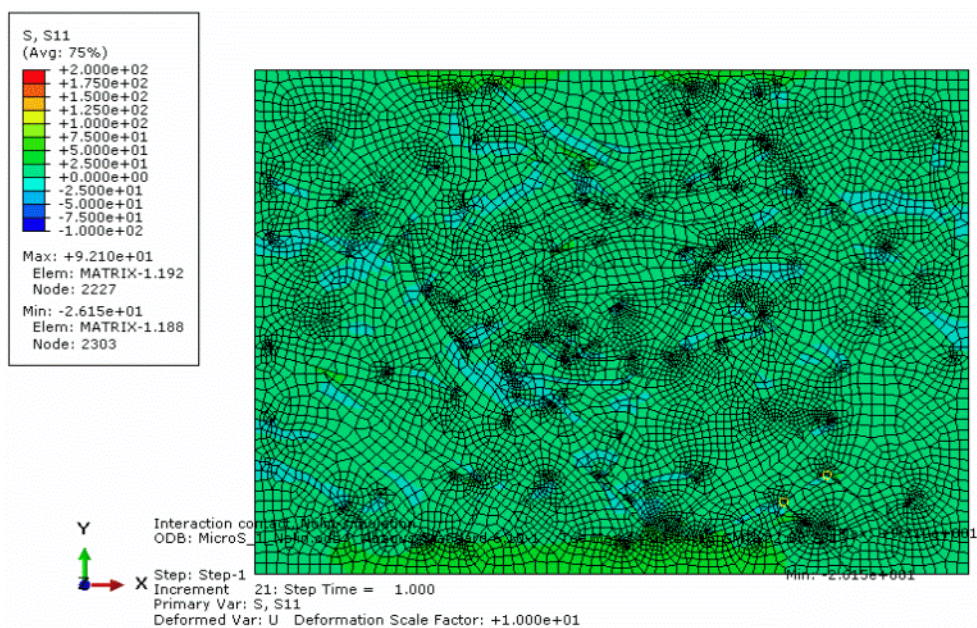
Obr. 5.9: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“



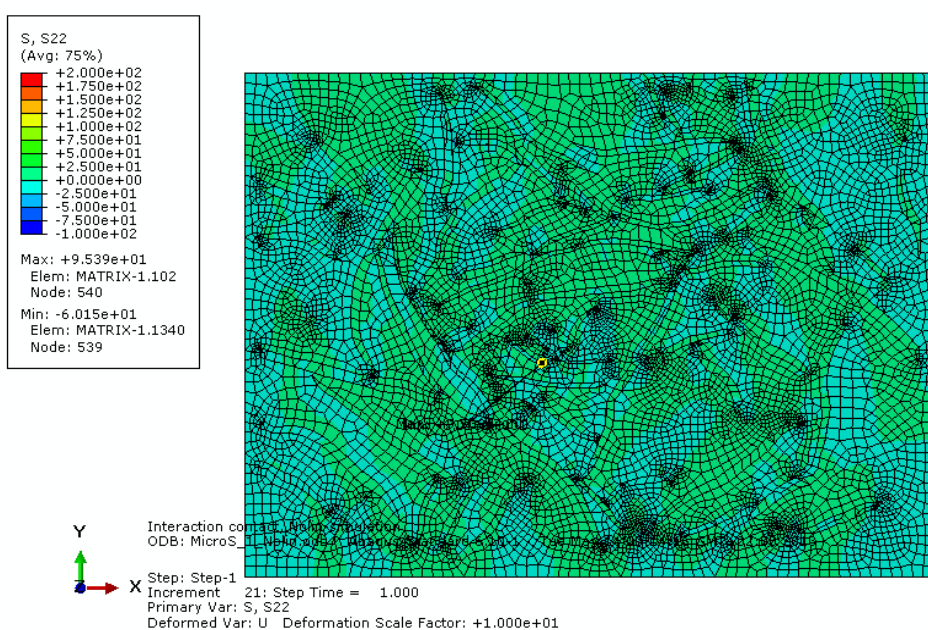
Obr. 6.0: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 5.9 a 6.0 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.

Vzájemně působící kontakt

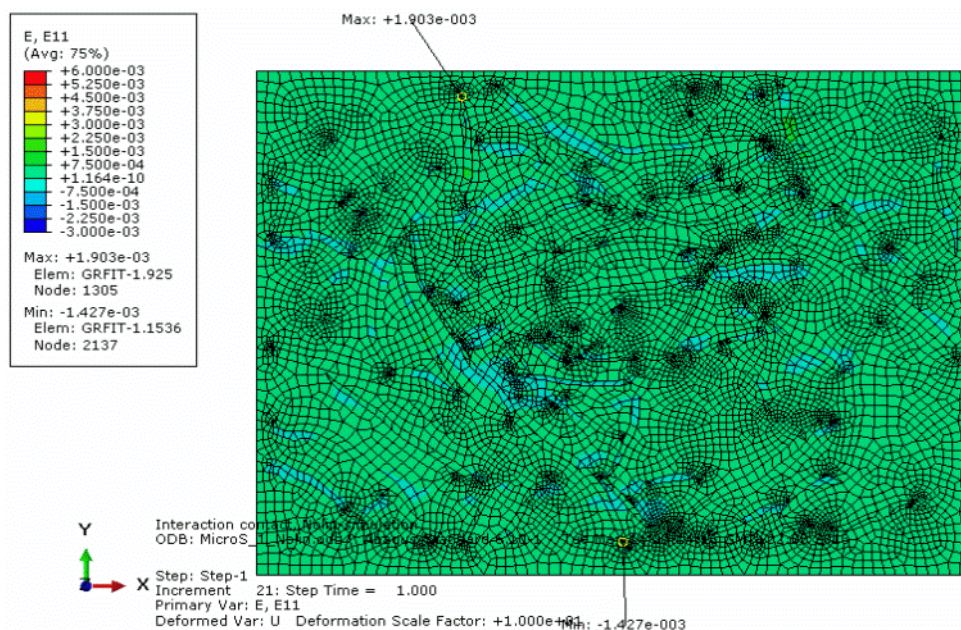


Obr. 6.1: Tah-S11-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

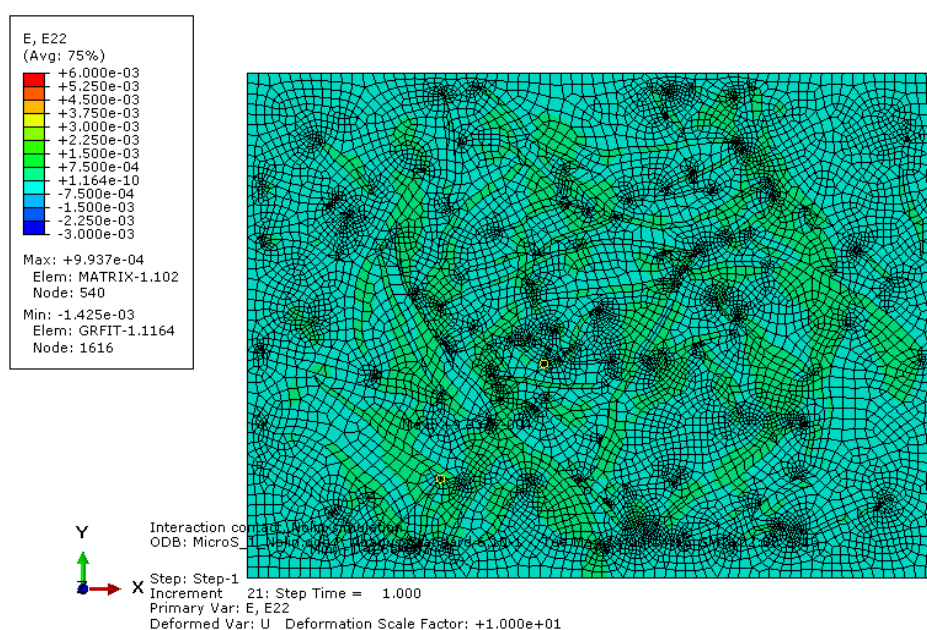


Obr. 6.2: Tah-S22-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

Na obrázcích 6.1 a 6.2 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.



Obr. 6.3: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

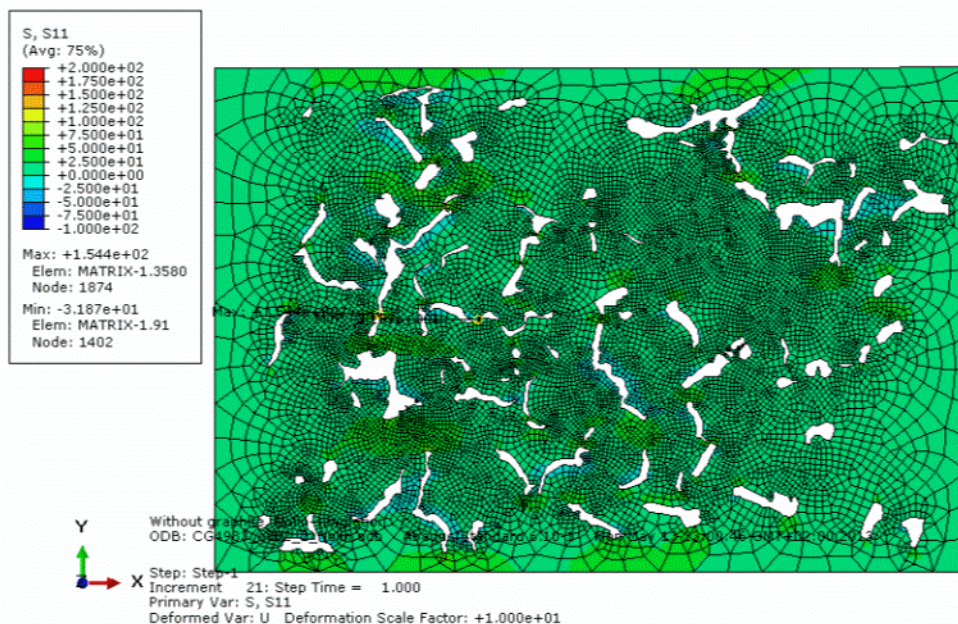


Obr. 6.4: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Vzájemně působící kontakt“

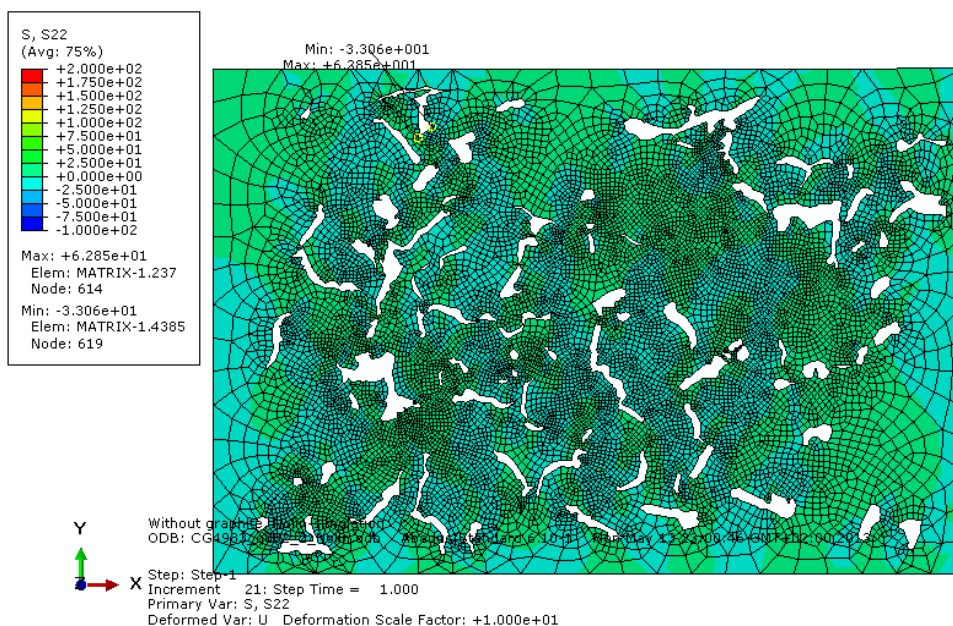
Na obrázcích 6.3 a 6.4 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech S11(X) a S22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vzájemně působící kontakt“.

Vizualizace výsledků u vzorku 3 (CG4983_q002) - Nelineární simulace

Dutiny (Bez grafitu)

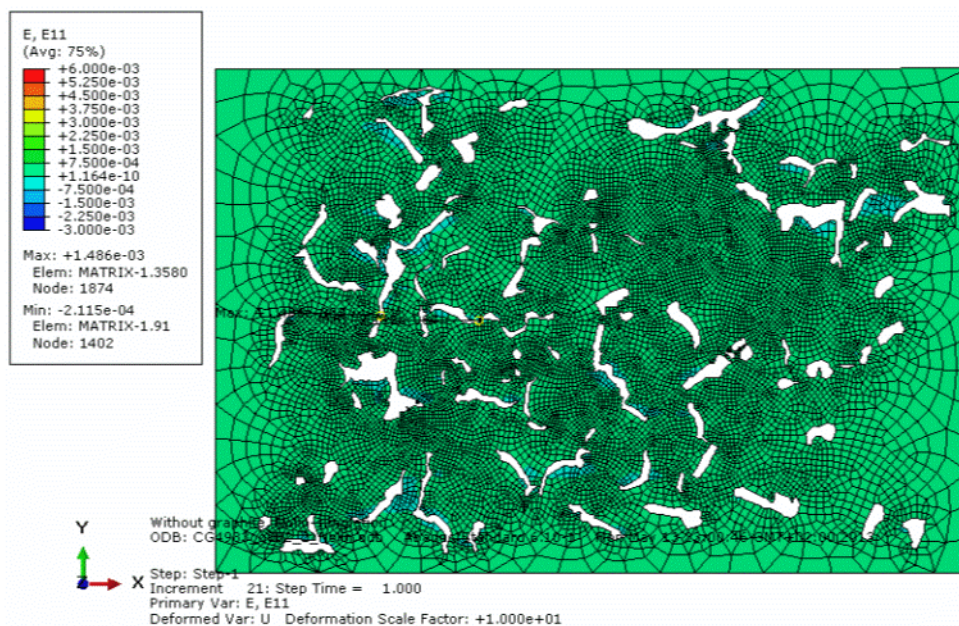


Obr. 5.3: Tah-S11-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

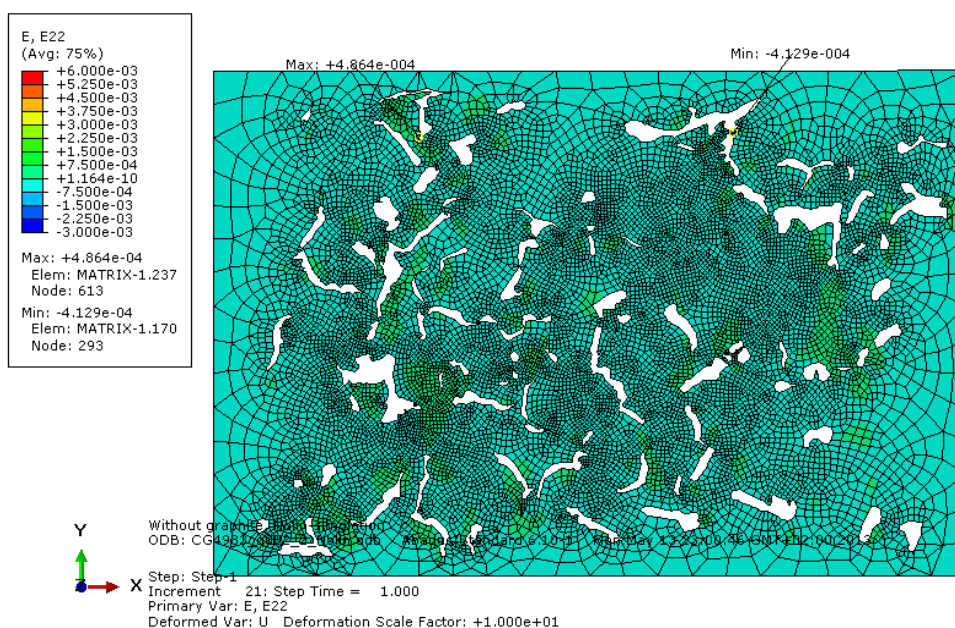


Obr. 5.4: Tah-S22-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 5.3 a 5.4 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech S11(X) a S22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).



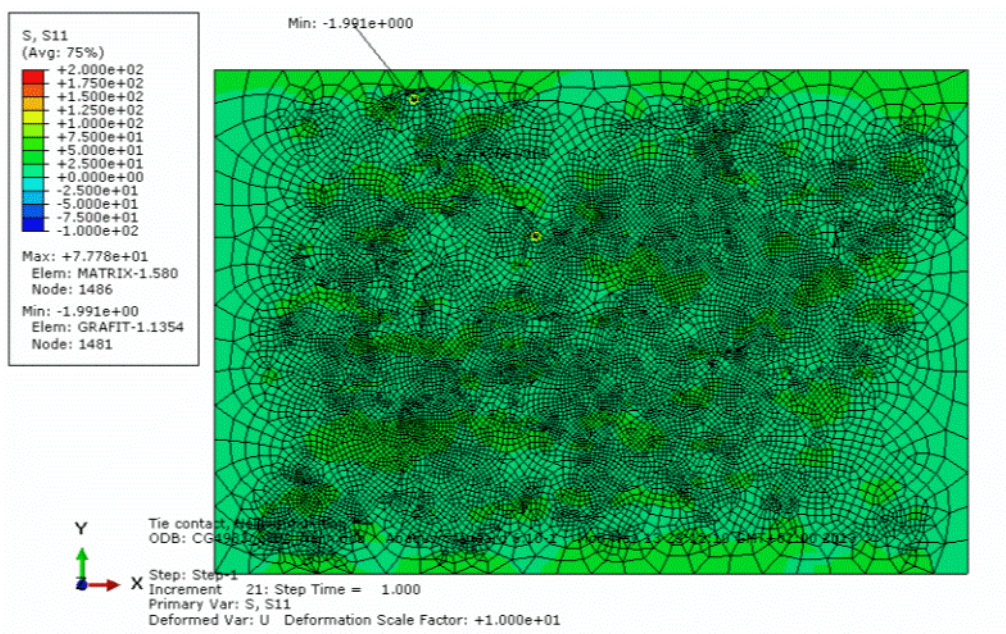
Obr. 5.5: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)



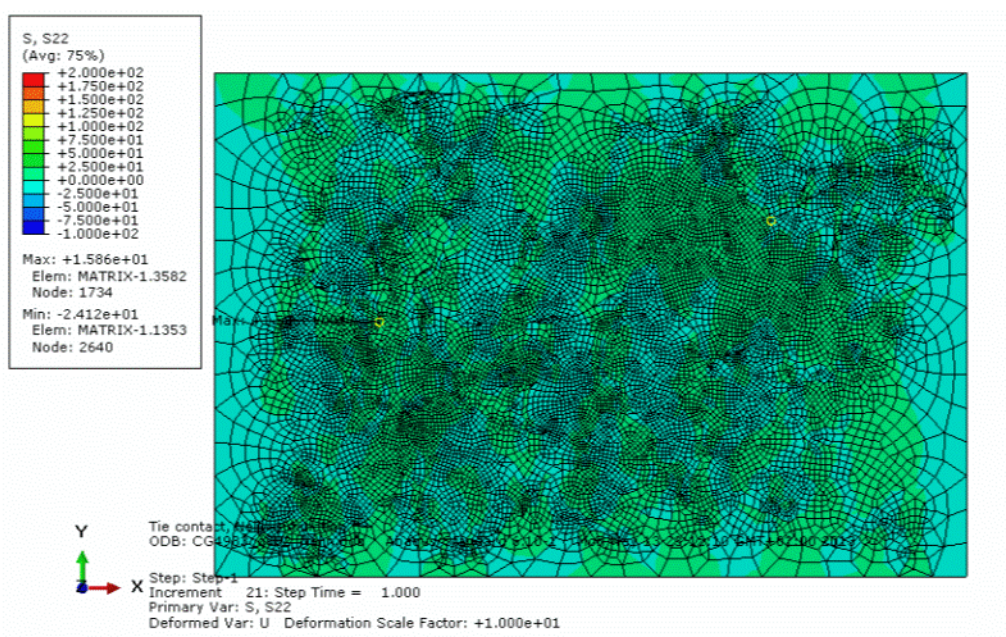
Obr. 5.6: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Dutiny“ (Bez grafitu)

Na obrázcích 5.5 a 5.6 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Dutiny“ (Bez grafitu).

Vázaný kontakt

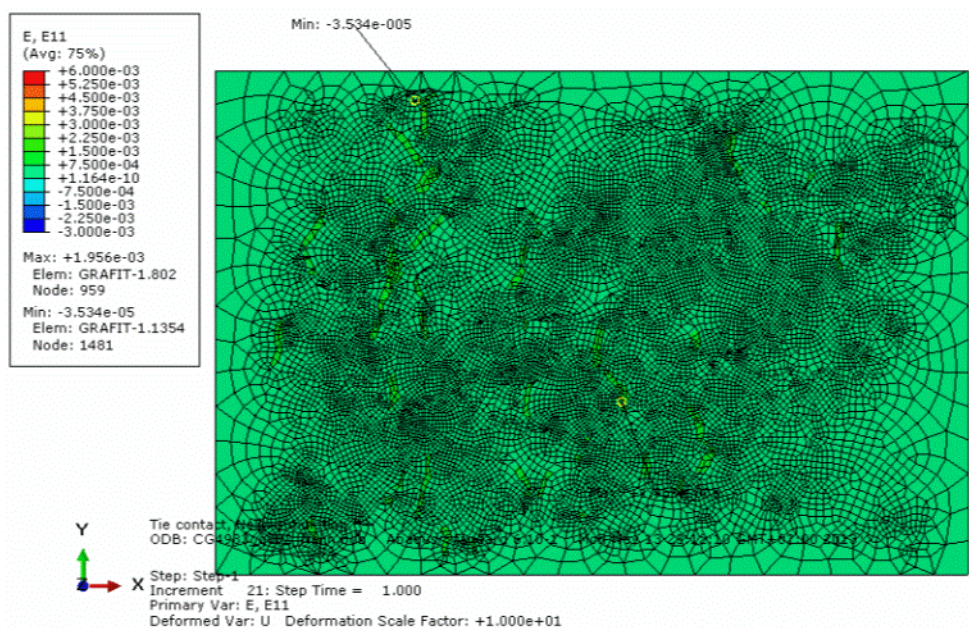


Obr. 5.7: Tah-S11-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

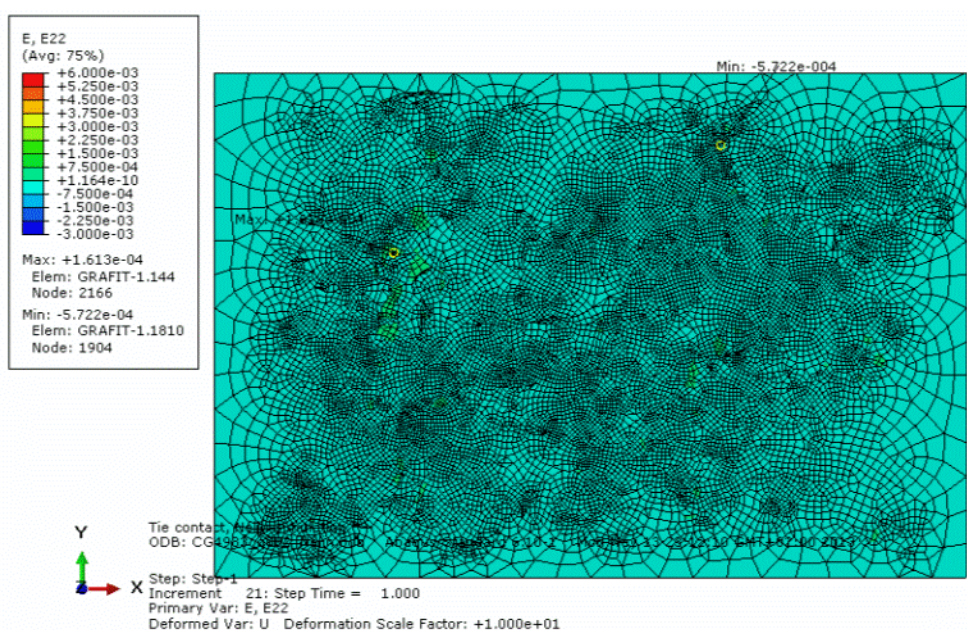


Obr. 5.8: Tah-S22-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 5.7 a 5.8 jsou zobrazeny výsledky tahu ve směrech $S_{11}(X)$ a $S_{22}(Y)$ pro Nelineární simulace s posunutím $5E-05\text{mm}$ a s typem interakce „Vázaný kontakt“.

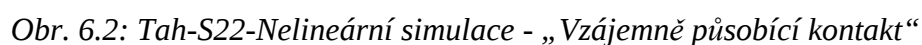
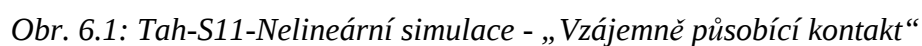


Obr. 5.9: Tlak-E11-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“



Obr. 6.0: Tlak-E22-Nelineární simulace - „Vázaný kontakt“

Na obrázcích 5.9 a 6.0 jsou zobrazeny výsledky tlaku ve směrech E11(X) a E22(Y) pro Nelineární simulace s posunutím 5E-05mm a s typem interakce „Vázaný kontakt“.



180

