

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

DISERTAČNÍ PRÁCE

TEPELNÉ POMĚRY MEZI ODLITKEM A KOKILOU
PŘI GRAVITAČNÍM LITÍ

Liberec, 2005

Jiří Rus

Poděkování

Rád bych využil příležitosti a touto formou vyjádřil své poděkování zejména své školitelce Prof. Ing. Ivě Nové, CSc. Rád bych jí poděkoval nejen za její odbornou pomoc při řešení problematiky, ale také za rady, které mi pomohly takto rozsáhlou oblast zpracovat. Nemohu nezmínit také její přínos osobní a děkuji jí také za pomoc v oblasti osobního života, kdy mi pomohla svými postoji a mohl jsem se na ni obrátit nejen s profesními a odbornými problémy.

Dále bych také rád poděkoval všem pracovníkům Katedry strojírenské technologie, kteří mi vždy ochotně pomohli jak při provádění experimentů, tak při odborných konzultacích během celého mého studia.

Resumé

Předložená disertační práce se zabývá studiem tepelných poměrů mezi odlitkem a kokilou při gravitačním lití. Měření a následné vyhodnocování je zaměřeno na studium neželezných kovů a to hlavně slitin hliníku, které jsou v současnosti často používány zejména v automobilovém průmyslu.

Cílem práce bylo najít metodiku jak získat skutečné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin v závislosti na čase a jejich následnou implementaci do simulačních programů. Rozvoj použití simulačních programů ve slévárenské praxi dospěl do určitého limitního stavu pro svou nižší přesnost výpočtu zjednodušeným zadáním právě hodnot tepelně fyzikálních veličin.

Při přípravě experimentální části nastal problém při navrhování měřicího zařízení pro snímání časové závislosti vzniku, průběhu a rozměrové charakteristiky plynové vrstvy mezi odlitkem a kokilou. Nejprve jsem se pokusil navrhnout snímání podélných změn pomocí indukčního snímače. Při této metodě bylo poměrně složité ustavení indukčního snímače do polohy, která odpovídá měřenému místu. To bylo vyřešeno použitím křemenných trubiček. Zároveň se však ukázalo jako velmi problematické kalibrování indukčního snímače, zapojení elektronických prvků a převod analogového signálu na digitální a následná registrace. V té době se naskytla možnost použití registrační jednotky měřicího zařízení polské výroby. Tato pak byla použita pro experimentální část.

Pro měření závislosti teploty odlitku a kokily na čase bylo použito měřicí zařízení standardně používané na KST – TU Liberec.

Při vlastním experimentu bylo provedeno velké množství měření pro různé materiály (čistý hliník, čistý zinek, čisté olovo, AlSi13, AlSi10MgMn) při různých technologických podmínkách (teplota lití, teplota kokily, tloušťka nástřiku). Cílem bylo zjistit vliv jednotlivých podmínek jak na průběh teplot, tak také na vznik a průběh růstu vzduchové mezery mezi odlitkem a kokilou.

Následně byly získané výsledky z experimentálních měření porovnávány s výsledky výpočtů simulačního programu SIMTEC. Tento program má vlastní databázi tepelně fyzikálních veličin, kterou lze editovat. Pomocí zpětného simulačního výpočtu byly stanoveny hodnoty součinitele prostupu tepla. Díky experimentálnímu změření vzniku a průběhu mezery, byla i tato implementována do simulačních výpočtů pro jejich zpřesnění.

Prínos této práce spočívá ve zjištění časových závislostí součinitele prostupu tepla pro systém odlitek-mezera-nátěr-kokila a vytvoření databáze reálných dat, která lze při běžném omezení využití simulačních technologií použít a získat značnou přesnost výpočtu. Také byl stanoven způsob, jak lze právě vznik a průběh vzduchové mezery implementovat do výpočtového modulu.

Summary

The presented dissertation deals with research into thermal relations between a casting and a mould during gravity casting. The measurement and subsequent evaluation focus on research into non-ferrous metals, especially aluminium alloys, which are currently often used mainly in the car industry.

The objective of my work was to find a methodology for obtaining actual values of thermal-physical properties in dependence on time and their subsequent implementation into simulation programs. The expansion of use of simulation programs in foundry practice has reached a certain limit condition as a result of its lower accuracy of calculation due to simplified setting of the values of thermal-physical properties.

A problem in designing the measuring equipment for scanning the time relation of arising, course and dimensional characteristics of the gas layer between the casting and the mould occurred during the preparation of the experimental part. First I attempted to design scanning of longitudinal changes using an inductive pick-off. For this method, it was rather complicated to set the inductive pick-off in the position matching the measured spot. That was solved using quartz glass tubes. At the same time, however, calibration of the inductive pick-off, the connection of electronic elements and the transfer of an analogue signal to digital and subsequent recording proved to be very problematic. At that time, an opportunity arose to use the recording unit of a measuring device made in Poland. That unit was used for the experimental part.

Measuring equipment used as standard at the Department of Design of Machine Elements and Mechanisms of the Technical University of Liberec was used to measure the dependence of the temperature of a casting and a mould on time.

For the experiment itself, a large number of measurements were carried out on various materials (pure aluminium, pure zinc, pure lead, AlSi13, AlSi10MgMn) in various technological conditions (teeming temperature, temperature of mould, thickness of sprayed material). They were meant to reveal the influence of individual conditions on the course of temperatures as well as the creation and course of growth of an air gap between a casting and a mould.

Subsequently the results obtained from experimental measurements were compared with the results of calculations from the SIMTEC simulation program. This program comes with its own editable database of thermal-physical properties. Using a reverse simulation calculation, the values of the overall heat transfer coefficient were determined. Thanks to the experimental measurement of the creation and course of growth of the gap, it was also implemented to refine the simulation calculations.

The benefit of this work lies in establishing time relations of the overall heat transfer coefficient for the casting-gap-paint-mould system and creating a database of real data which can be used in case of ordinary limitation of the use of simulation technologies to acquire significant accuracy in calculations. The method for implementation of the creation and the course of growth of the air gap into the calculation module was also determined.

O B S A H

	Str.
Přehled nejdůležitějších veličin a jejich jednotek	6
1. ÚVOD	9
2. CHARAKTERISTIKA TEPELNÝCH POMĚRŮ MEZI ODLITKEM A SLÉVÁRENSKOU FORMOU	14
2.1 Zákonitosti tuhnutí odlitků ve slévárenských formách	15
2.2 Sdílení tepla mezi odlitkem a slévárenskou formou	17
2.2.1 Sdílení tepla na povrchu slévárenské formy	18
2.2.2 Sdílení tepla v kovové slévárenské formě	19
2.3 Metody řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla	22
3. VLIV TEPELNÉHO PŘECHODOVÉHO ODPORU NA ŘEŠENÍ TEPELNÝCH DĚJŮ MEZI ODLITKEM A FORMOU	26
3.1 Tepelný přechodový odpor a součinitel prostupu tepla	28
3.2 Stanovení velikosti plynové vrstvy	33
4. TEPELNĚ – FYZIKÁLNÍ VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ TEPELNÉ DĚJE V SYSTÉMU ODLITEK – KOVOVÁ FORMA	35
4.1 Součinitel tepelné vodivosti	36
4.2 Měrná tepelná kapacita	38
4.3 Součinitel teplotní vodivosti	40
4.4 Součinitel přestupu tepla	41
4.5 Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy	42
4.6 Fyzikální veličiny odlévaného kovu	44
5. CHARAKTERISTIKA KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM (KOKIL)	45
5.1 Životnost kovových slévárenských forem	46
5.2 Materiál kovových slévárenských forem	47
5.3 Předehřev kovových slévárenských forem	48
5.4 Nátěr kovových slévárenských forem	49
6. ZAHRNUTÍ VLIVU TEPELNÉHO PŘECHODOVÉHO ODPORU DO VÝPOČTŮ TEPELNÝCH DĚJŮ SYSTÉMU ODLITEK – KOVOVÁ FORMA S VYUŽITÍM MKP	50
6.1 Rozpracování metody konečných prvků pro řešení teplotních polí	50
7. NÁVRH A SESTAVENÍ MĚŘICÍ APARATURY PRO MĚŘENÍ VZNIKU A PRŮBĚHU VZDUCHOVÉ VRSTVY MEZI ODLITKEM A KOVOVOU FORMOU	61
7.1 Popis provedených experimentů	64
7.2 Hodnocení získaných výsledků	67
8. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULAČNÍ VÝPOČTY TEPELNÝCH DĚJŮ MEZI ODLITKEM A KOVOVOU FORMOU	67
8.1 Popis zařízení pro měření teplotních polí ve slévárenských formách	68
8.2 Charakteristika materiálů kovových slévárenských forem	69

Klíčová slova: vzduchová mezera, plynová vrstva, tepelně-fyzikální veličiny, teplotní pole, neželezné kovy, slitina hliníku, kokila, simulační program, aktivita kyslíku, litina, modifikace

Keywords: air gap, gas layer, thermal-physical properties, thermal field, non-metallic, aluminum alloy, mould, simulation program

Téma práce: Tepelné poměry mezi odlitkem a kokilou při gravitačním lití

Anotace:

Předložená disertační práce se zabývá studiem tepelných poměrů mezi odlitkem a kokilou při gravitačním lití. Měření a následné vyhodnocování je zaměřeno na studium neželezných kovů a to hlavně slitin hliníku, které jsou v současnosti často používány zejména v automobilovém průmyslu.

Cílem práce bylo najít metodiku jak získat skutečné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin v závislosti na čase a jejich následnou implementaci do simulačních programů. Rozvoj použití simulačních programů ve slévárenské praxi dospěl do určitého limitního stavu pro svou nižší přesnost výpočtu zjednodušeným zadáním právě hodnot tepelně fyzikálních veličin.

Při přípravě experimentální části nastal problém při navrhování měřícího zařízení pro snímání časové závislosti vzniku, průběhu a rozměrové charakteristiky plynové vrstvy mezi odlitkem a kokilou. Nejprve jsem se pokusil navrhnout snímání podélných změn pomocí indukčního snímače. Při této metodě bylo poměrně složité ustavení indukčního snímače do polohy, která odpovídá měřenému místu. To bylo vyřešeno použitím křemenných trubiček. Zároveň se však ukázalo jako velmi problematické kalibrování indukčního snímače, zapojení elektronických prvků a převod analogového signálu na digitální a následná registrace. V té době se naskytla možnost použití registrační jednotky měřícího zařízení polské výroby. Tato pak byla použita pro experimentální část.

Pro měření závislosti teploty odlitku a kokily na čase bylo použito měřící zařízení standardně používané na KST – TU Liberec.

Při vlastním experimentu bylo provedeno velké množství měření pro různé materiály (čistý hliník, čistý zinek, čisté olovo, AlSi13, AlSi10MgMn) při různých technologických podmínkách (teplota lití, teplota kokily, tloušťka nástríku). Cílem bylo zjistit vliv jednotlivých podmínek jak na průběh teplot, tak také na vznik a průběh růstu vzduchové mezery mezi odlitkem a kokilou.

Následně byly získané výsledky z experimentálních měření porovnávány s výsledky výpočtů simulačního programu SIMTEC. Tento program má vlastní databázi tepelně fyzikálních veličin, kterou lze editovat. Pomocí zpětného simulačního výpočtu byly stanoveny hodnoty součinitele prostupu tepla. Díky experimentálnímu změření vzniku a průběhu mezery, byla i tato implementována do simulačních výpočtů pro jejich zpřesnění.

Přínos této práce spočívá ve zjištění časových závislostí součinitele prostupu tepla pro systém odlitek-mezera-nátěr-kokila a vytvoření databáze reálných dat, která lze při běžném omezení využití simulačních technologií použít a získat značnou přesnost výpočtu. Také byl stanoven způsob, jak lze právě vznik a průběh vzduchové mezery implementovat do výpočtového modulu.

Klíčová slova: vzduchová mezera, plynová vrstva, tepelně-fyzikální veličiny, teplotní pole, neželezné kovy, slitina hliníku, kokila, simulační program, aktivita kyslíku, litina, modifikace

Theme of the thesis: Thermal relations between a casting and a mould during gravity casting

Abstract:

The presented dissertation deals with research into thermal relations between a casting and a mould during gravity casting. The measurement and subsequent evaluation focus on research into non-ferrous metals, especially aluminum alloys, which are currently often used mainly in the car industry.

The objective of my work was to find a methodology for obtaining actual values of thermal-physical properties in dependence on time and their subsequent implementation into simulation programs. The expansion of use of simulation programs in foundry practice has reached a certain limit condition as a result of its lower accuracy of calculation due to simplified setting of the values of thermal-physical properties.

A problem in designing the measuring equipment for scanning the time relation of arising, course and dimensional characteristics of the gas layer between the casting and the mould occurred during the preparation of the experimental part. First I attempted to design scanning of longitudinal changes using an inductive pick-off. For this method, it was rather complicated to set the inductive pick-off in the position matching the measured spot. That was solved using quartz glass tubes. At the same time, however, calibration of the inductive pick-off, the connection of electronic elements and the transfer of an analogue signal to digital and subsequent recording proved to be very problematic. At that time, an opportunity arose to use the recording unit of a measuring device made in Poland. That unit was used for the experimental part.

Measuring equipment used as standard at the Department of Design of Machine Elements and Mechanisms of the Technical University of Liberec was used to measure the dependence of the temperature of a casting and a mould on time.

For the experiment itself, a large number of measurements were carried out on various materials (pure aluminium, pure zinc, pure lead, AlSi13, AlSi10MgMn) in various technological conditions (teeming temperature, temperature of mould, thickness of sprayed material). They were meant to reveal the influence of individual conditions on the course of temperatures as well as the creation and course of growth of an air gap between a casting and a mould.

Subsequently the results obtained from experimental measurements were compared with the results of calculations from the SIMTEC simulation program. This program comes with its own editable database of thermal-physical properties. Using a reverse simulation calculation, the values of the overall heat transfer coefficient were determined. Thanks to the experimental measurement of the creation and course of growth of the gap, it was also implemented to refine the simulation calculations.

The benefit of this work lies in establishing time relations of the overall heat transfer coefficient for the casting-gap-paint-mould system and creating a database of real data which can be used in case of ordinary limitation of the use of simulation technologies to acquire significant accuracy in calculations. The method for implementation of the creation and the course of growth of the air gap into the calculation module was also determined.

Keywords: air gap, gas layer, thermal-physical properties, thermal field, non-metallic, aluminum alloy, mould, simulation program

8.3	Měření teploty	74
8.4	Stanovení a vyhodnocení tloušťky použitého nástřiku DYCOTE5	76
8.5	Použité slévárenské slitiny a jejich příprava pro experimenty	79
8.6	Popis experimentů při sledování časových závislostí teplot v odlitku a kokile	80
8.7	Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků v kovových formách	84
8.7.1	Přehled tepelně-fyzikálních veličin potřebných pro simulační výpočet	85
8.8	Vyhodnocení naměřených a simulovaných výsledků	146
8.9	Celkové zhodnocení simulačních výpočtů	186
8.10	Vyhodnocení teplotních závislostí součinitelů prostupu tepla β	187
8.11	Simulační výpočty tuhnutí odlitku tvaru desky	188
9.	DISKUSE VÝSLEDKŮ	189
10.	ZÁVĚR	198
11.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	202

PŘÍLOHY

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; $C = C_0 \cdot \varepsilon$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
C_0	- součinitel sálání absolutně černého tělesa; $C_0 = 5,775 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
grad T, ΔT	- teplotní gradient (rozdíl teplot ve dvou místech tělesa) [K]
h	- tloušťka vrstvy mezi odlitkem a kokilou [m]
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_x, l_y, l_z	- směrové kosíny normály k povrchu [1]
l_0	- délka tělesa za teploty T_0 [m]
l_t	- délka tělesa za teploty T_t [m]
L_{KR}	- latentní (krystalizační) teplo pro 1 kg kovu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
M	- modul odlitku [m]
M	- hmotnost látky [kg]
MKP	- Metoda konečných prvků
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, Q_{AK}	- 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 [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_F	- počáteční teplota formy [$^{\circ}\text{C}$], [K]
$T_{Fstř}$	- střední teplota formy [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_{KR}	- teplota krystalizace taveniny [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_l	- lící teplota [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_L	- teplota likvidu odlévané taveniny [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_S	- teplota solidu odlévané taveniny [$^{\circ}\text{C}$], [K]

T_{PF}	- teplota povrchu formy [°C], [K]
T_{PO}	- teplota povrchu odlitku [°C], [K]
T_{TAV}	- teplota tavení [°C], [K]
$\Delta T_1, \Delta T_O$	- gradient teplot v odlitku [°C], [K]
$\Delta T_2, \Delta T_F$	- gradient teplot ve formě [°C], [K]
ΔT_M	- gradient teplot v mezeře [°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 [$m^2 \cdot K^1/W$]
$TOP_{POČ}$	- počáteční tepelný přechodový odpor [$m^2 \cdot K^1/W$]
TPO_{OXID}	- tepelný přechodový odpor oxidické vrstvy odlitku [$m^2 \cdot K^1/W$]
TPO_{VZ}	- tepelný přechodový odpor vzduchové vrstvy [$m^2 \cdot K^1/W$]
TPO_N	- tepelný přechodový odpor nátěru kokily [$m^2 \cdot K^1/W$]
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_{PVch}	- tloušťka plynové vrstvy při chladnutí odlitku [m]
X_{PchS}	- tloušťka plynové vrstvy vyvolaná smrštěním ztuhlého kovu [m]
X_{PchF}	- tloušťka plynové vrstvy vyvolaná smrštěním kokily [m]
X_{PVt}	- tloušťka plynové vrstvy v době tuhnutí odlitku [m]
X_{Pvo}	- tloušťka plynové vrstvy způsobená smrštěním pevné kůry tuhnoucího odlitku [m]
X_{PtF}	- tloušťka plynové vrstvy způsobená roztažením kokily [m]
X_2	- tloušťka prohráté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí odlitku [m]
x, y, z	- prostorové souřadnice bodu [m]
α_1	- součinitel přestupu tepla na hranici odlitek – oxidická vrstva [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_2	- součinitel přestupu tepla na hranici nátěr kovová forma [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α	- součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_K^*	- součinitel lineární roztažnosti materiálu kokily [K^{-1}]
α_D	- součinitel přestupu tepla dotykem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_{F-O}	- součinitel přestupu tepla mezi formou a okolím [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_S	- součinitel přestupu tepla sáláním [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_{SO}^*	- součinitel lineárního smrštění odlitku [K^{-1}]
α_{LSf}^*	- součinitel lineárního roztažení materiálu kokily [K^{-1}]
α_{Lso}^*	- součinitel lineárního smrštění pevné kůry odlitku [K^{-1}]
β	- efektivní součinitel prostupu tepla mezerou [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
β_M	- součinitel prostupu tepla v mezeře [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
δ	- tloušťka vrstvy, kterou prochází teplo [m]
ε	- emisní součinitel sálání resp. poměrná sálavost tělesa (0,7 až 0,9);
λ_1	- součinitel tepelné vodivosti tělesa 1 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ_2	- součinitel tepelné vodivosti tělesa 2 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ_F	- součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ_M	- součinitel tepelné vodivosti mezery [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ_N	- součinitel tepelné vodivosti nátěru / nástřiku [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_O	- součinitel tepelné vodivosti odlitku [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{OV}	- součinitel tepelné vodivosti oxidické vrstvy [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_P	- součinitel tepelné vodivosti plynové vrstvy [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	- součinitele tepelné vodivosti ve směrech x, y, z [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ξ	- tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku [m]
ρ_F	- hustota formy [kg.m ⁻³]
σ	- Stefan Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]
χ	- hustota tepelného toku [W.m ⁻²]
∇	- Laplaceův nabra operator
FEM	- finite elements method
FDM	- finite diferents method
BEM	- boundry elemente method
BIE	- boundry integral equation method
CVM	- cntrol volume method

1. ÚVOD

Slévárenství patří u nás i ve světě mezi důležitá odvětví průmyslu. Jako ve všech oblastech lidské činnosti i zde rostou požadavky na vzrůst kvality, hospodárnosti a produktivity výroby. Toho by nemohlo být docíleno, pokud by se neustále nerozšiřovaly a nezpřesňovaly naše teoretické poznatky o celé této problematice. Jedním z důležitých oborů, které přispívají k pochopení složitých dějů, které proces slévání doprovázejí, je sledování teplotního pole odlitku a slévárenské formy. Při dobrém zvládnutí popisu teplotního pole slévárenské formy a odlitku jsme schopni určit proces tuhnutí a chladnutí odlitku. Tento proces, tuhnutí a chladnutí odlitku, a současný ohřev slévárenské formy, je případem nestacionárního sdílení tepla a hmoty. V praxi je termokinetika soustavy odlitek - slévárenská forma - okolí natolik složitá, že se stává neřešitelnou. Z tohoto důvodu se přistupuje při řešení této problematiky ke zjednodušujícím předpokladům. Ze všech tří možných způsobů přenosu tepla (vedením, prouděním a sáláním) uvažujeme přenos tepla uvnitř soustavy pouze vedením. V současné době, kdy dochází ke značnému rozvoji výpočetní techniky, ukazuje se metoda konečných prvků jako vhodná metoda pro možnost sledování teplotních poměrů ve slévárenských formách a odlitcích. Pomocí této metody jsme schopni tepelné procesy ve slévárenské formě i proces tuhnutí a chladnutí odlitku simulovat. Přesnost výsledků je však přímo závislá na přístupnosti a přesnosti materiálové databáze a použitém software a hardware. V tabulce 1-1 je uveden přehled simulačních výpočtových software.

Na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci se již po několik let úspěšně provádí výzkum tepelných poměrů mezi odlitkem a různými typy slévárenských forem, kdy jsou současně popisovány jednotlivé procesy a zpřesňovány hodnoty tepelně-fyzikálních veličin materiálů odlitků i slévárenských forem. Experimentální výsledky jsou uplatňovány při simulačních výpočtech tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách s pomocí simulačního software SIMTEC od německé firmy RWP Aachen a NovaFlow & Solid od firmy NovaCast S.A. švédské provenience.

Významným jevem, který zcela zásadním způsobem ovlivňuje teplotní pole v soustavě odlitek – kokila při gravitačním lítí je **mezera** mezi odlitkem a slévárenskou formou, do které lze zahrnout oxidickou vrstvu na povrchu odlitku, vrstvu zaplněnou vzduchem a plyny a oxidickou vrstvu líce kovové formy (resp. nátěr líce formy). Problém

vzniku a růstu mezery mezi odlitkem a slévárenskou formou a jeho vliv na šíření tepla není dosud dostatečně znám. To mě vedlo k myšlence, pokusit se popsat tento jev při odlévání odlitku jednoduchého tvaru se současnou aplikací simulačního výpočtu.

Tabulka 1-1 Přehled simulačních slévárenských software [69]

NÁZEV PROGRAMU	ZEMĚ PŮVODU	METODA TVORBY	SIMULAČNÍ VÝPOČET ZAHRNUJE			
			PLNĚNÍ FORMY	TUHNU TÍ A CHLAD.	ZBYTK. PNUTÍ	STRUKTURA ODLITKU
PROCAST ^(TM)	USA	FEM	X	X	X	X
SIMTEC	NĚMECKO	FEM	X	X	X	X
MAGMA SOFT	NĚMECKO	FDM	X	X	X	X
NOVA FLOW NOVA SOLID	ŠVÉDSKO	FDM	X	X	-	X
SIMULOR	FRANCIE	FDM	X	X	-	-
SOLSTAR	UK	MM	-	X	-	-
THEL	NĚMECKO	FDM	-	X	X	-
PAM-CAST ^(TM)	FRANCIE	FDM	X	X	-	X
AFS SOLIDIFICATION SYSTEM 3D	USA	FDM	X	X	-	-
CAP	USA	FDM	X	X	X	X
CAST CAE	FRANCIE	FDM	X	X	-	X
CAST VIEW	KANADA	FDM	X	X	-	X
FLOW 3D	USA	FDM	X	X	-	X
MAVIS DIANA	UK	FDM	X	X	-	-
PASSAGE/ POWERCASE	USA	FEM	X	X	X	X
CALCO SOFT	ŠVÝCARSKO	FEM	X	X	-	X
METALCORE ^(TM) /FORECAST ^(TM)	KANADA	FEM	X	X	X	X

a) Přehled současného stavu problematiky tepelných dějů mezi odlitkem a formou

Řešením problematiky tepelných dějů mezi odlitkem a formou je aktuálním tématem slévárenství asi od 30. let 19. století. Od této doby se touto problematikou zabývalo mnoho výzkumníků, kteří věnovali největší pozornost tuhnutí a chladnutí konkrétního odlitku.

První práce vypracoval SCHWARTZE [1], NEUMANN, CARSLAW [18]. Světově uváděné i v dnešní době jsou práce CHVORINOVA [2], [3], který navázal na dřívější řešení Schwartze a Neumanna a uvedl svůj velmi jednoduchý zákon druhé mocniny pro popis tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru desky ve slévárenských formách. Řešení této problematiky presentovali GIRŠOVIČ [4], VEJNIK [5], [6], [7], [8] a ANISOVIČ [9], a provedli zjednodušující nahrazení křivek při řešení teplotních polí v tepelné ose odlitku a ve stěně slévárenské formy. Přínosná je také práce NECHENDZIHO [10] a HALBARTA, jak uvádí [11], který podobně jako Vejník a Anisovič uvádí výpočty součinitele tepelné akumulace formy při tuhnutí odlitků jednoduchých tvarů. Analytickým řešením tuhnutí odlitků se zabýval GOODMAN [22].

Řešením tepelných dějů mezi odlitkem a formou se u nás začal zabývat především v 60. letech 20. století PŘIBYL [12], který sledoval tuhnutí a chladnutí ocelových odlitků. V tomto směru dále pokračoval jeho žák a spolupracovník HAVLÍČEK [11], [25] který řešil tepelné procesy při odlévání do hutnických kokil.

HLOUŠEK a KAVIČKA, se zabývají převážně termokinetikou tuhnutí odlitku a provádí analytické a numerické výpočty tuhnutí nejrůznějších odlitků. Pro technologická uplatnění mají význam práce [26], [27] a další.

Pro slévárenskou problematiku jsou dále velmi přínosné práce, které se zabývají sledováním tepelně-fyzikálních veličin odlévaných materiálů, materiálů forem i formovacích a jádrových směsí nebo specifických vlivů na tepelné procesy. V tomto smyslu lze uvést např. práce HAVLÍČKA [11], VETIŠKY [17], JELÍNKA [15], RUSÍNA [29], a MAZÁNKOVÉ [42]. Ze současných zahraničních výzkumníků, je možno uvést práce GRITTITHSE [50], FEACKELDEYHO [51], TROVANTA [52], LEWISE [53], SANTOSE [45], MARTORANA a CAPOCCHIHO [46], kteří se zabývají sdílením tepla mezi odlitkem a kovovou formou při odlévání různých slévárenských materiálů. V poslední době k rozvoji řešení tepelných dějů přispěly i práce kolektivu vedeného prof. Exnerem, který řešil grantové projekty v rámci GAČR [60], [62] a mezinárodní grant COPERNICUS [61].

b) Cíl doktorské práce

Hlavním cílem této práce je provést komplexní rozbor tepelných dějů mezi odlitkem a kovovou formou při gravitačním lití se zaměřením na vznik plynové vrstvy (mezery) a

vlivu tepelného odporu a jeho vlivu na technologii výroby odlitků i simulační výpočty tepelných dějů mezi odlitkem a formou.

K řešení hlavního cíle bylo nutno řešit tyto dílčí úkoly:

1. Provést teoretický rozbor sdílení tepla mezi odlitkem a formou při tuhnutí odlitků ve formě s popisem specifik jednotlivých etap sdílení tepla (od nalití taveniny do formy, přenos tepla z tuhnoucího odlitku do formy a na vznik a řešení teplotního pole v odlitku a ve formě). Současně provést fyzikálně matematický popis stanovení tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku ve slévárenské formě.
2. Rozpracovat numerickou metodu konečných prvků a začlenění vlivu tepelného přechodového odporu do výpočtu.
3. Navrhnout metodiku sledování tepelných procesů mezi odlitkem a formou včetně vlivu tepelného přechodového odporu.
4. Navrhnout a uplatnit měřicí zařízení pro vznik a registraci plynové vrstvy mezi odlitkem a formou a vypracovat vhodnou metodiku měření.
5. Provést experimentální měření teplotních polí v odlitku a ve formě s nátěrem a bez nátěru i průběh vzniku plynové mezery.
6. Na základě provedených experimentálních měření provést simulační výpočty tepelných dějů mezi odlitkem a formou a pomocí zpětné simulace stanovit teplotní závislosti součinitelů prostupu tepla při různých podmínkách.
7. Aplikace získaných výsledků na simulaci tepelných procesů konkrétních, průmyslově vyráběných odlitků z neželezných kovů odlévaných do kokil gravitačním způsobem.
8. Shrnout dosažené teoretické poznatky i experimentální a výpočtové výsledky. Současně formulovat dílčí závěry pro technologické uplatnění v technické praxi.

Při řešení jsem si stanovil tyto cíle:

1. Teoretický rozbor sledované problematiky, dle současných poznatků:
 - ☐ popsat důležité tepelně fyzikální vlastnosti slévárenských slitin a kovů, které ovlivňují teplotní pole slévárenské formy a odlitku
 - ☐ popis tepelně fyzikálních dějů, ke kterým dochází mezi odlitkem a slévárenskou formou době tuhnutí a chladnutí odlitku.
2. Provedení experimentálních měření s cílem získání:
 - ☐ časových závislostí teploty v odlitku a kokile v různých místech od jejího líce

□ časových závislostí vzniku a tloušťek mezery v souvislosti se změnou počátečních podmínek prováděných experimentů.

3. Simulační výpočty teplotních polí kovových forem a dosažení shody naměřených a nasimulovaných výsledků.
4. Aplikace získaných výsledků na simulaci tepelných procesů konkrétních, průmyslově vyráběných odlitků z neželezných kovů odlévaných do kokil gravitačním způsobem.
5. Formulování dílčích závěrů dosažených praktických poznatků i formulování teoretických přínosů práce.

Přehled publikací k dané problematice.

1. NOVÁ, I., EXNER, J., RUS, J.: Uplatňování výpočetní techniky při projektování výrobního postupu odlitku. In: Sborník přednášek z odborné konference „Perspektivy slévárenství“ Plzeň 3. - 4. Června 1997, s 71 - 78
2. NOVÁ, I., EXNER, J., RUS, J.: Simulation of heat transfer in iron moulds. [Copernicus CIPA - 94 - 0125]. Department of metallurgy, TU Liberec, on Tuesday the 24th of June, 1997
3. NOVÁ, I., EXNER, J., RUS, J., HÝBLEROVÁ, M.: Experimentální stanovení tepelně-fyzikálních vlastností slévárenských forem. In. Sborník vědeckých prací TU Liberec - TU Dresden, září 1997, TU Liberec-FS, s.175 - 180.
4. NOVÁ, I., EXNER, J., RUS, J., TRUSKA, J.: Příspěvek k simulování tepelných procesů v kovových slévárenských formách. In. Slévárenství XLV, 1997, č.8, s. 324 - 327.
5. NOVÁ, I., EXNER, J., RUS, J., HÝBLEROVÁ, M.: Příspěvek k modelování teplotních polí v pískových formách. In. Sborník z konference: „Slévárny a jejich konkurenceschopnost.“, Plzeň, 2. - 3. Června 1998, s. 123 - 127.
6. NOVÁ, I., RUS, J., MATYÁŠEK, P.: Vliv nástřiku líce formy při modelování tepelných dějů v soustavě odlitek - kokila. [Posterová sekce]. 35. Slévárenské dny s mezinárodní účastí. Brno, září 1998.
7. RUS, J.: Study of thermal processes in the casting - mould systém. Junior - Euromat, Lousanne, Switzerland, Europe conference, September 7 - 11, 1998

Práce byla řešena v podmínkách Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci.

2. CHARAKTERISTIKA TEPELNÝCH POMĚRŮ MEZI ODLITKEM A FORMOU

Výroba odlitků ve slévárenské formě představuje velmi složitý pochod, skládající se z jednotlivých, na sebe navazujících dílčích etap, které zahrnují komplex velmi složitých tepelných, fyzikálních, fyzikálně-chemických i chemických dějů.

Jednou z důležitých etap tohoto pochodu jsou děje spojené s přechodem materiálu odlitku z tekuté do tuhé fáze. Během této etapy odlitek získává tvar, strukturu, fyzikální a mechanické vlastnosti. Kromě toho může při této etapě docházet ke vzniku vad odlitku, jeho staženin, pórovitosti, vnitřnímu pnutí, deformacím atd.

Základem celého procesu jsou tepelné děje ke kterým dochází při utváření odlitku ve slévárenské formě. Tepelná energie (teplo) z tuhnoucího odlitku je sdílena do slévárenské formy, popř. do okolního prostředí. Tepelné poměry mezi odlitkem a formou závisí jak na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy a odlévaného materiálu, ale i na podmínkách sdílení tepla na rozhraní těchto dvou objektů. Z hlediska termodynamiky lze odlitek považovat za 1. termodynamickou soustavu, která ztrácí tepelnou energii a slévárenskou formu za 2. termodynamickou soustavu, která teplo z odlitku přijímá a současně ho akumuluje. Po celou dobu od nalití taveniny do dutiny formy až po vyjmutí odlitku z formy, je forma jedním z rozhodujících faktorů vlastností budoucího odlitku (určuje nejen tvar, rozměry, krystalickou strukturu, ale také vlastnosti odlitku). Sledování komplexního tepelného procesu je velmi složité, neboť v soustavě odlitek – forma probíhá řada pochodů z nichž k nejvýznamnějším se řadí: přenos tepla tekutým kovem; přenos tepla z taveniny do slévárenské formy; uvolňování skupenského tepla při tuhnutí a fázových přeměnách; přestup tepla mezi tekutým a ztuhlým kovem v odlitku; vedení tepla tuhým kovem; přestup tepla z formy do okolí; popř. sálání tepla otevřenými nálitky.

Pro řešení uvedených dějů je nutné znát celou řadu podmínek, které tyto děje charakterizují. Z hlediska obecného pohledu na tepelné děje mezi odlitkem a formou dochází k výměně tepla:

- 1) vedením (kondukcí);
- 2) prouděním (konvekcí);
- 3) sáláním (radiací).

Podíl konvekce a sálání odlitků menších rozměrů je nevýrazný, rozhodující je přestup tepla vedením. Tato doktorská práce uvádí specifika tepelných dějů, která se týkají odlévání do kovových forem gravitačním způsobem.

Problematikou sdílení tepla mezi odlitkem a formou se nezabýval žádný autor v takovém rozsahu, aby byla vypracována komplexní charakteristika celého tepelného procesu. V této souvislosti je třeba uvést, že se v této práci snažím na základě prostudování nejrozumnějších tepelných teorií o provedení komplexnějšího popisu.

Současně je třeba si uvědomit, že celý tepelný děj při utváření odlitku ve formě lze rozdělit na dvě velké výzkumné oblasti zahrnující:

- 1) Zákonitosti tuhnutí odlitků ve slévárenských formách;
- 2) Zákonitosti sdílení tepelné energie z tuhnoucího odlitku do slévárenské formy.

2.1 Zákonitosti tuhnutí odlitků ve slévárenských formách

Pod pojmem tuhnutí odlitku rozumíme postup a usměrňenost krystalizačních vrstev tak, aby byla docílena homogenní struktura odlitku, která je nositelem jeho vlastností.

Z tepelného hlediska je tuhnutí a chladnutí odlitků spojeno s uvolňováním tepla, které přechází z tuhnoucí taveniny přes ztuhlou vrstvu odlitku do slévárenské formy.

Původní řešení, které se zabývalo tuhnutím odlitku bylo vypracováno STEFANEM (koncem 19. stol.) a později NEUMANNEM [17] jako analogie promrzávání vlhké půdy. Dále se též tuhnutím odlitků zabývali např. SCHWARZ [1] CHVORINOV [3] CARSLAW a JAEGER [18], LIGHTFOOT [19], VEJNÍK [5], VETIŠKA [17], KAVIČKA a HLOUŠEK [26] atd.

Někteří autoři vychází z matematického a fyzikálního řešení tuhnutí odlitků na základě nestacionárního sdílení tepla vedením jako např. NEUMANN [17], SCHWARZ [1], LIGHTFOOT [19], HLOUŠEK a KAVIČKA [28], kdy hlavním cílem byl výpočet doby tuhnutí odlitku.

CARSLAW – JAEGER [18] na základě řady zjednodušujících předpokladů odvodili vztah pro určení tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku ξ :

$$\xi = \frac{2 \cdot \lambda_F (T_{PR} - T_F)}{\rho_M \cdot L_{KR} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_F}} \cdot \sqrt{t}, \quad (2.1)$$

kde značí: λ_F – tepelnou vodivost materiálu formy;
 ρ_M – hustotu odlévaného materiálu;
 L_{KR} – latentní krystalizační teplo odlévaného materiálu.
 T_{PR} – teplota přehřátí
 T_F – teplota formy
 A_F – součinitel teplotní vodivosti formy

Řešení NEUMANNA, které uvádí VETIŠKA [17] je z velké části shodné s CARSLAWEM a JEAGEREM, liší se však v tom, že uvažuje i přehřátí roztaveného kovu a množství tepla uvolněné ztuhlou vrstvou taveniny, avšak neuvažuje vliv formy na rychlost tuhnutí odlitku. Též vychází z předpokladu, že nárůst ztuhlé vrstvy probíhá dle parabolického zákona. LIGHTFOOT [19] vychází při svém řešení z úvahy, že plocha krystalizace je pohybující se zdroj tepla. Jeho zjednodušující předpoklady řešení jsou shodné s Neumannem.

Řešení podle SCHWARTZE [1], vycházející z Neumanna, je doplněno o vliv slévárenské formy a v tomto smyslu jsou rozšířeny i zjednodušující předpoklady (mezi odlitkem a formou uvažuje těsný styk; v průběhu tuhnutí mezi odlitkem a formou nevzniká plynová vrstva; mimo latentního skupenského tepla nejsou v tuhnoucím kovu žádné vnitřní zdroje; teplota odlitek – forma je konstantní). Také Schwarz pro průběh tuhnutí odlitku uvažuje parabolickou závislost v tomto tvaru:

$$\xi = k \cdot \sqrt{t}, \quad (2.2)$$

kde značí: k – konstantu tuhnutí;
 t – čas tuhnutí odlitku.

Ve slévárenské praxi je velmi známé řešení podle CHVORINOVA [3], který vychází z prací SCHWARZE a „parabolického zákona“ a jako první ukázal, že pomocí střední hodnoty konstanty tuhnutí lze vypočítat dobu tuhnutí odlitků konečných rozměrů, o libovolné velikosti, tvaru a materiálu. Současně také ukázal, že na rychlost tuhnutí odlitku má vliv i velikostní a tvarový charakter odlitku, což začal definovat poměrem objemu odlitku ku povrchu odlitku (resp. styčnému povrchu odlitku s formou). Tento poměr se dnes nazývá modulem odlitku (**M**), [m]. Zavedl vztah pro výpočet doby tuhnutí odlitku libovolné velikosti a tvaru:

$$t_{TUH} = \left(\frac{V}{S} \right)^2 = \left(\frac{M}{k} \right)^2 \quad (2.3)$$

Také práce VEJNIKA, které se zabývají tuhnutím odlitku jsou velmi rozsáhlé [5], [6], [7], uplatňují bohatý matematický aparát a zabíhají do oblastí výroby různých typů odlitků.

Současné metody řešení ztuhlé vrstvy odlitku včetně teplotního pole jsou založeny na nestacionárních podmínkách sdílení tepla, které tak jako ve formě i zde popisuje Fourierova diferenciální rovnice sdílení tepla:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{ZDR}, \quad (2.4)$$

kde značí: T - teplotu;

ρ - hustotu;

c_p - měrnou tepelnou kapacitu;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých směrech os kartézského systému;

x, y, z - souřadnice systému;

Q_{ZDR} – měrný výkon všech vnitřních zdrojů v daném objemu.

Rovnice (2.4) popisuje sdílení tepla v nejobecnější podobě, neboť je odvozena na základě obecných fyzikálních zákonů. Pro její řešení je nutné znát počáteční a okrajové podmínky. Řešení rovnice (2.4) je uvedeno v další části této práce, její další aplikace prostřednictvím numerické metody je v simulačních slévárenských programech.

2.2 Sdílení tepla mezi odlitkem a slévárenskou formou

Podmínkami sdílení tepla se zabývají práce MICHEJEVA [34], ŠORINA [36], KAVIČKY [33] a HAVLÍČKA [25], který sledoval sdílení tepla mezi ingotem a kokilou. Aplikace obecných podmínek tepelných dějů vyžaduje uplatnění vlivů, kterými se vyznačuje utváření konkrétního odlitku ve slévárenské formě.

Podmínky pro přestup tepla z kovu do formy se během odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitku neustále mění. Během fáze plnění formy se uskutečňuje přechod tepla z kovu do formy bezprostředním stykem taveniny se stěnou formy a to s maximální intenzitou.

Tavenina je v tomto případě v pohybu. Chladnější forma přejímá (akumuluje) z teplejšího kovu jeho teplo a tím dochází k ohřevu formy při současném ochlazování taveniny. Po odlití bezprostřední styk tekutého kovu s formou trvá ještě určitou dobu, jen s tím rozdílem, že kov už je v klidu. Obecně lze konstatovat, že tepelné děje v soustavě odlitek - forma jsou až do úplného zchladnutí odlitku děje složité, neustálené, nestacionární (časově proměnné).

Jakmile tavenina po určité době dosáhne teploty likvidu T_L , nastává přechod kovu ze skupenství kapalného do skupenství tuhého, a to postupně ve směru od stěny formy či jádra až k tepelné ose odlitku. Čím rychleji forma odvádí z kovu teplo, tím rychleji probíhá proces krystalizace. Protože rychlost odvodu tepla z kovu formou je závislá na tepelně fyzikálních vlastnostech formy, plyne z toho závěr, že rychlost tuhnutí odlitku je limitována tepelně fyzikálními vlastnostmi odlitku a formy (měrná hmotnost, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné akumulace aj.) a jejich konstrukcí (tvar, rozměry).

Při lici formy se vytváří ztuhlá vrstva kovu, čímž se neustále mění podmínky pro přestup tepla z odlitku do formy. Se stěnami formy se stýká vrstva tuhého kovu, jehož tloušťka neustále narůstá na úkor množství taveniny. Je-li navíc líc formy opatřen vrstvou (vrstvami) ochranného nátěru nebo nástřiku (popř. nástřiku i nátěru), přestup tepla probíhá vícevrstvou stěnou. V případě kovové slévárenské formy se brzy po vytvoření vrstvy tuhého kovu v důsledku smršťování této vrstvy tvoří vzduchová vrstva, která ovlivňuje intenzitu přestupu tepla z odlitku do formy.

2.2.1 Sdílení tepla na povrchu slévárenské formy

Mezi odlitkem a formou obecně může docházet k výměně tepla vedením, prouděním a sáláním. Jde o velmi složitý proces sdílení tepla. Výměna tepla vedením a prouděním, která probíhá současně, se souhrnně označuje jako výměna tepla dotykem. Sdílení tepla na povrchu slévárenské formy lze fyzikálně popsat za stacionárních podmínek **Newtonovým zákonem**, který stanovuje množství tepelného toku $[q_D = \alpha_D \cdot (T_{pO} - T_{pF})]$. Pro celkové množství tepla Q , které přechází z odlitku do formy lze psát:

$$Q = \alpha_D \cdot (T_{pO} - T_{pF}) \cdot S \cdot t \quad (2.5)$$

kde značí: T_{pO} - teplotu povrchu odlitku;

T_{pF} - teplotu povrchu formy;

S - styčnou plochu mezi odlitkem a formou;

t - čas;

α_D - součinitel přestupu tepla dotykem.

Tento tepelný proces nastává především mezi taveninou a formou (popř. mezi odlitkem a formou) a 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 B_{iO} a formy B_{iF} , jehož tvar je:

$$B_{iO} = \frac{\alpha_D \cdot X_O}{\lambda_O} \quad [1] \quad B_{iF} = \frac{\alpha_D \cdot X_F}{\lambda_F} \quad [1] \quad (2.6)$$

Biotovo číslo odlitku je tedy 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 (dotykem a 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 ovlivňuje intenzitu sdílení tepla mezi odlitkem a formou. O významu a důsledcích vzduchové vrstvy při sdílení tepla mezi odlitkem a formou je věnována kapitola 3.

2.2.2 Sdílení tepla v kovové slévárenské formě

Uvnitř kovové slévárenské formy se teplo sdílí *v e d e n í m*. Mírou sdílení tepla v tomto prostředí je intenzita hustoty tepelného toku $\bar{q}$, kterou lze vyjádřit Fourierovým zákonem:

$$\bar{q} = -\lambda_F \cdot \text{grad } T \quad (2.7)$$

kde značí: $\bar{q}$ - intenzitu tepelného toku v kovové slévárenské formě;

λ_F - tepelnou vodivost kovové formy;

grad T - teplotní gradient ve formě.

Vedení tepla při nestacionárních podmínkách v kovové slévárenské formě popisuje, tak jako v odlitku, diferenciální Fourierova rovnice (2.4), která fyzikálně představuje popis časové změny teploty v libovolném místě tělesa, vyvolané přenosem tepla a působením případných vnitřních zdrojů energie.

Diferenciální rovnici (2.4) lze na základě zjednodušujících předpokladů, resp. pro izotropní prostředí zapsat do více užívaného tvaru:

$$\frac{\partial T(c_p \cdot \rho)}{\partial t} = a \nabla^2 T + Q_{ZDR} \quad (2.8)$$

kde značí: a – součinitel teplotní vodivosti ($a = \lambda / (c_p \cdot \rho)$)

∇^2 – Laplaceův operátor.

Fourierova diferenciální rovnice (2.4), resp. (2.8) je založena na obecných fyzikálních zákonitostech a proto popisuje přenos tepla v nejobecnější formě a jejím řešením je možno získat nekonečný počet výsledků, které se více, či méně přibližují k dané problematice. K tomu, aby bylo možno vybrat řešení odpovídající právě sledované problematice, je třeba matematicky a fyzikálně formulovat jeho zvláštnosti a to ve formě počátečních a okrajových podmínek, které musí řešení diferenciální rovnice splňovat. Počáteční podmínka popisuje rozložení teploty v tělese v určitém časovém okamžiku, resp. v okamžiku $t = 0$. Pro trojrozměrný případ sdílení tepla má počáteční podmínka výraz $T(x, y, z, t) = f(x, y, z)$. Často lze však počáteční podmínku formulovat tak, že v okamžiku $t = 0$ je teplota v tělese rovnoměrně rozložena, pak:

$$T(x, y, z) = T_0 = \text{konst.} \quad (2.9)$$

Okrajové podmínky zahrnují především geometrické a fyzikální charakteristiky sledovaných těles, rozložení teplot v určitém časovém okamžiku, charakteristiku pochodu probíhajícího mezi tělesy a okolím. Jak je obecně známo, rozlišujeme 5 druhů okrajových podmínek:

Okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova) – to je podmínka, při které je v každém časovém okamžiku známo rozdělení teplot na povrchu tělesa, což lze zapsat: $T_p = f(x, y, z, t)$, kde značí T_p – teplotu na povrchu tělesa. Ve zvlášť jednoduchém případě, který však asi v reálných podmínkách téměř neexistuje, se předpokládá: $T_p = \text{konst.}$

Okrajová podmínka II. druhu (Neumannova) – je to podmínka, která uvažuje tepelné toky v každém bodě povrchu tělesa pro každý časový okamžik tělesa: $q_p = f(x, y, z, t)$, kde značí q_p – hustotu tepelného toku na povrchu tělesa. K jednodušším případům formulace této podmínky patří případ konstantního povrchového tepelného toku: $q_p = \text{konst.}$ Zcela nejjednodušší a velmi častý je případ tepelně izolovaný a tedy adiabatický povrch (hranice), kdy $q_p = 0$.

Okrajová podmínka III. druhu (Newtonova) – charakterizuje konvekční přestup tepla do okolí. Tepelný tok na povrchu tělesa je dán vztahem: $q_p = \alpha(T_p - T_o)$, kde značí T_p – teplotu povrchu a T_o – teplotu okolí, α – součinitel přestupu tepla mezi povrchem a okolím, zahrnuje vliv konvekce a sálání. Součinitel $\alpha = \alpha_{\text{SAL}} + \alpha_{\text{KON}}$. Podmínka je splněna za předpokladu $\alpha_{\text{KON}} > \alpha_{\text{SAL}}$. Je-li $\alpha_{\text{SAL}} \gg \alpha_{\text{KON}}$, pak okrajová podmínka III. druhu přechází v podmínku II. druhu. Je-li $\alpha = \alpha_{\text{SAL}} + \alpha_{\text{KON}} = \infty$; okrajová podmínka III. druhu přechází v podmínku I. druhu.

Okrajová podmínka IV. druhu (Fourierova) – charakterizuje dokonalý kontakt, resp. těsný styk dvou těles, takže není žádný teplotní spád, což lze zapsat rovností tepelných toků:

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

Pak poměr teplotních gradientů povrchů těles zůstává konstantní a je určen poměrem tepelných vodivostí materiálů obou těles, za předpokladu dokonalého fyzikálního kontaktu stykových ploch.

Okrajová podmínka V. druhu – má uplatnění ve speciálních případech, kdy při ochlazování nebo ohřevu dochází k fázové přeměně polohy pásma fázové přeměny s časem KAVIČKA [33]. Okrajová podmínka V. druhu je v podstatě rozšířením okrajové podmínky IV. druhu. Pokud je množství vyvíjeného skupenského tepla fázové přeměny dostatečně velké a prostředí není schopno dostatečně rychle přivádět nebo odvádět teplo z pásma fázové přeměny, pak se změna skupenství uskutečňuje v úzkém pásmu. Pásmo přeměny se pak uskutečňuje rychlostí $w = d\xi/dt$. Pak rovnice tepelné bilance v pásmu fázové změny, resp. podmínka V. druhu, má tvar:

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

Uvažujeme-li, že se jedná o tuhnutí čistého kovu, pak ξ je tloušťka vrstvy ztuhlého kovu (index 1), zbylá část taveniny (index 2). Tato okrajová podmínka má uplatnění 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.

2.3 Metody řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla

Řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést: analyticky, numericky nebo experimentálně. Každá z těchto úloh může být deterministická nebo stochastická.

Analytická metoda umožňuje získání tepelné úlohy ve tvaru matematického výrazu, kdy teplota je funkcí souřadného systému a času. Analytické metody se dělí na přesné a přibližné. Avšak technické tepelné úlohy jsou úlohami přibližnými, neboť každý model je pouze přibližným vyjádřením skutečnosti. Mezi analytické metody patří metoda separace proměnných (označuje se také jako Fourierova metoda). Dále mezi tyto metody patří metody Greenových funkcí a metoda tepelných potenciálů. Další analytické metody jsou metody integrální transformace (Laplacova a Fourierova), variační metody (Ritzova, Kantorovičova a Biotova) a metody algebro-logické, které jsou vhodné pro řešení prostorových tvarově složitých tepelných úloh ustálených i neustálených.

Numerické metody se v současné době velmi používají při výpočtech složitých systémů, kdy se uplatňují simulační výpočty. Totéž platí pro tepelné děje mezi odlitkem a slévárenskou formou. Podstata numerických metod závisí na diskretizaci proměnných, k čemu přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu, což odpovídá operačním vlastnostem číslicových počítačů KUNEŠ [49]. Výhoda numerických metod je v tom, že umožňují získat řešení tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních míst (uzlů) zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to buď v celé oblasti nebo její povrchové části. Mezi numerické metody se řadí metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí a metoda okrajových prvků.

1. Metoda konečných prvků, mezinárodně označovaná FEM (Finite Elemente Method) je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků – „konečných prvků“, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků. Skutečný průběh vyšetřované fyzikální veličiny, resp.

teploty uvnitř prvků aproximujeme při řešení zvolenou funkcí, přičemž je nutné, aby tato funkce byla jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech. Hodnoty teploty v uzlových bodech jsou pak základní neznámé parametry řešení. Výpočtem těchto parametrů je určen průběh fyzikální veličiny v dané oblasti. MKP vychází z jedné varianty Ritzovy variační metody, která je spojena s minimalizací funkcionálu přiřazeného určité tepelné úloze a příslušnému matematickému modelu. Při výpočtu teploty je možno postupovat různými způsoby, jež se liší přístupem k řešení základní diferenciální rovnice vedení tepla a volbou dělení sledovaného prostoru na prvky. Dělení prostoru na prvky lze provést buď metodou, která využívá Eulerův teorém nebo metodou, která uplatňuje Galerkinův princip. Metoda konečných prvků má proti metodě konečných diferencí řadu předností. Umožňuje aproximovat zakřivený tvar křivkovými prvky. Poměrně snadno se dají vyjádřit oblasti složené z různých anizotropních materiálů. Obtíže nečiní ani vyjádření okrajových podmínek a jejich nespojitostí. Také dřívější nevýhody spojené s vyššími nároky na kapacitu paměti a rychlost počítače jsou dnes překonány.

2. Metoda konečných diferencí, mezinárodně označovaná FDM (Finite Differenzen Method), označovaná též jako metoda sítí je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami, odpovídající diferenční rovnici, jež má tvar algebraických rovnic. Metoda sítí se stává jednou z nejužívanějších přibližných metod numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic. Je jednoduchá a zároveň univerzální, takže se dá použít k velmi rozmanitým typům hraničních úloh včetně nelineárních. Proto se velká část technických problémů vedoucích k parciálním rovnicím řeší touto metodou.

Podstata metody konečných diferencí spočívá v aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající rovnici diferenční, která má tvar soustavy algebraických rovnic. Aproximace je tím dokonalejší, čím přesnějšími výrazy nahrazujeme derivace. Náhrada se provádí v diskrétních místech tvořených uzly sítě pokrývající zkoumanou oblast. Konečným výsledkem algebraických operací je určení hledané hodnoty v daném uzlu.

Metody konečných diferencí lze podle druhu zvoleného diferenčního výrazu rozdělit na tři základní schémata: *explicitní*, *implicitní* a *kombinované*, přičemž mohou být realizovány jako jednovrstvé, vícevrstvé nebo vícenásobné. Nejčastěji se používá implicitních diferenčních schémat. Ta používá zpětnou časovou diferenci, kdy Fourierova diferenciální rovnice je zjednodušena náhradou časové derivace teploty diferencí

$\left(\frac{T^K - T^{(K+1)}}{\Delta t} \right)$. Toto schéma umožňuje vypočítat neznámou teplotu $T^{(K+1)}$ ze soustavy

algebraických rovnic, kde každá rovnice odpovídá jednomu uzlovému bodu sítě. Tuto soustavu pak řešíme příslušnými numerickými metodami pro řešení soustav lineárních rovnic.

Používané sítě můžeme rozdělit na čtvercové, obdélníkové, a to pravidelné či nepravidelné, a speciální jako např. šestiúhelníkové, polární apod. Dnes prakticky nejpoužívanější druhy jsou pravoúhlé sítě. Nepravidelné se používají k usnadnění formulace okrajových podmínek a k zhušťování, respektive zředění sítě, protože přesnost aproximace závisí na hustotě sítě. Při zhušťování však roste numerická pracnost výpočtu a je proto výhodné zhušťovat síť jen v těch místech, kde nás zajímá zvýšená přesnost.

Metoda sítí je použitelná v podstatě pro libovolný typ parciální diferenciální rovnice. U některých typů úloh je však často nutné omezit se na speciální tvar sítě, kde časové dělení je závislé na prostorovém dělení.

Zvláštní variantou metody konečných diferencí je metoda CVM (Control Volume Method), která je používána při výpočtech přenosu tepla a hmoty. Tato metoda není z hlediska matematického díky své intuitivní stránce příliš preferována, avšak v případě volby jednoduchých objemů základních tvarů (válec, obdélník, koule atd.), je energetická rovnováha odpovídající vztahům FDM [48].

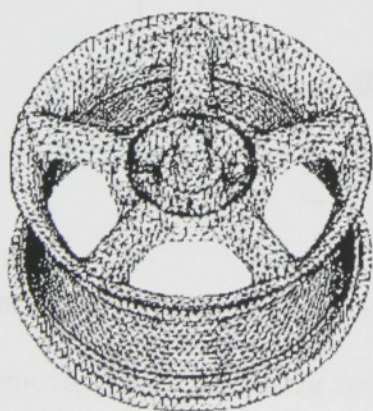
3. Metoda okrajových (hraničních) prvků, mezinárodně označovaná BEM (Boundry Elemente Method). V zahraniční literatuře se často označuje BIE (Boundary Integral Equation method). Je založena na principu fundamentálního řešení okrajové úlohy, které odpovídá funkci zdroje zadané ve tvaru Diracovy δ -funkce. V tomto případě se dají použít konečné prvky k aproximaci hranice oblasti a integrální rovnice pro vnitřní části oblasti. Zvláštností této metody je, že na rozdíl od metody FEM a FDM nevyžaduje diskretizaci a určování hodnot v celé oblasti, ale jen v její okrajové části. Metoda k tomu využívá možnosti převedení dané úlohy na určitou integrální rovnici. Tím se výrazně redukuje rozsah řešení a je pro řešení tepelných dějů ve slévárenských formách nevhodné.

Pokud hodnotíme FEM a FDM metody, obecně platí, že FDM umožňuje snadnou diskretizaci, což představuje menší nároky na hardware počítače i kratší dobu výpočtu. Na druhou stranu proložení sítě geometrickým modelem deformuje oblé či skosené části modelu (zejména při větších roztečích jednotlivých bodů sítě), což se projeví v přesnosti výpočtu,

pokud se neprovede lokální korekce. S jemností dělení sítě tedy souvisí přesnost výpočtu, ale také doba výpočtu a nároky na hardware počítače (operační paměť). Některé metody řešení mají zabudován algoritmus, který automaticky během výpočtu provádí opravu objemu a ploch elementů v závislosti na skutečné geometrii a použitých materiálech modelu.

Výhoda metody FEM spočívá v tom, že lépe kopíruje geometrický tvar povrchu modelu, umožňuje lokální zahuštění, tj. navolení větší hustoty sítě v určitých problémových místech. Na rozdíl od FDM lze řešit i deformace odlitku při vzájemné interakci s formou, neboť zavedení nelinearit typu velké deformace a kontaktní podmínky (teplotní i deformační) je u FEM poměrně jednoduché. Nevýhodou pak jsou větší nároky na hardware počítače a delší doba výpočtu. Obě metody FDM a FEM se ale dají i kombinovat. Například vlastní proces lití, tj. výpočty proudění a přenosu tepla řešit FDM s následným řešením pevnostní a deformační problematiky pomocí FEM. Pak je ale nutný přenos hodnot uzlových bodů ze sítě FDM do uzlových bodů sítě FEM.

Na obr. 2.1 je pro ilustraci uveden geometrický model odlitku kola generovaný metodami FEM a FDM.



FEM



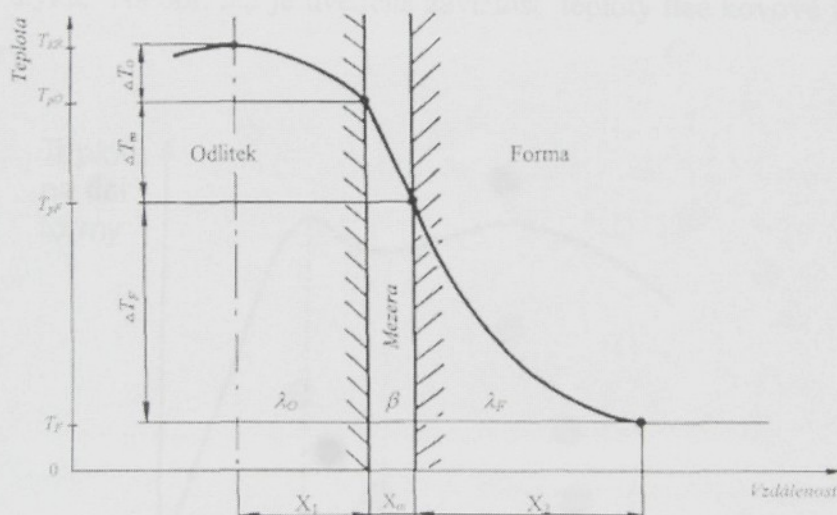
FDM

Obr. 2.1 Geometrické modely odlitku kola generovaného metodou FEM a FDM

3. VLIV TEPELNÉHO PŘECHODOVÉHO ODPORU NA ŘEŠENÍ TEPELNÝCH DĚJŮ MEZI ODLITKEM A FORMOU

Tato kapitola byla vytvořena na základě vlastní aplikace teoretických i praktických poznatků.

Následkem smršťování odlitku při poměrně rychlém ochlazování v kovové formě (kokile) a důsledkem rozměrových změn kokily při jejím ohřevu vzniká mezi odlitkem a formou plynová vrstva. V konkrétních provozních podmínkách je plynová vrstva hlavní součástí mezery (spáry). Mezera dále zahrnuje zoxidovaný povrch odlitku a tloušťku ochranného nátěru nebo nástřiku. Na obr. 3.1 je uvedeno schéma rozložení teploty v systému odlitek – mezera – kovová forma.



Obr. 3.1 Rozložení teploty v systému odlitek – mezera – kovová forma

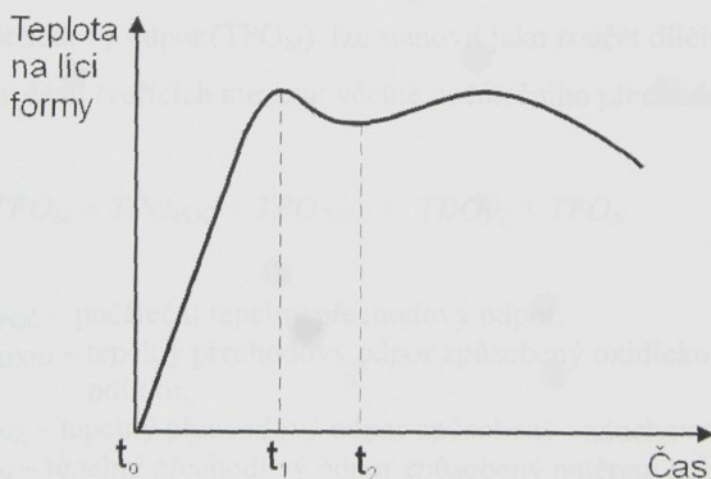
Plynová vrstva vzniká za určitou dobu po odlití taveniny do formy a z tepelného hlediska tvoří mezera přechodový tepelný odpor (TPO), který snižuje intenzitu sdílení tepla mezi odlitkem a formou, především v počátečním období tuhnutí odlitku. To má současně vliv i na dilataci, deformaci a napětí v odlitku.

V okamžiku vzniku vzduchové vrstvy dochází k dočasnému přerušení přestupu tepla do formy, což se projeví mírným zvýšením teploty povrchu odlitku a naopak poklesem teploty líce formy.

Za příčinou vzniku vzduchové vrstvy lze (mimo lineárního smrštění odlitku a roztažnosti formy během ohřevu) dále pokládat deformace formy, konstrukci a počáteční teplotu formy, rychlost a teplotu lití, tloušťku ochranného nátěru atd.

Problematikou vzniku mezery se zabýval HAVLÍČEK [11] a VEJNÍK [6]. Došli k závěru, že se netvoří kolem celého povrchu odlitku, ale vzniká pouze na plochách kolmých na podélný směr odlitku, tj. ve směru absolutního lineárního smrštění odlitku. Tato místa mohou být jak na svislých, tak i na vodorovných plochách odlitku. Naopak na spodních plochách odlitku se mezera tvoří jen v některých případech. Z důvodu, že vznik a tloušťka spáry je ovlivněna dilatací kovové formy, je její výskyt typický u kovových forem, resp. u forem s vysokou tepelnou akumulací (ochlazovací schopností). To lze vysvětlit tím, že kovová forma vykazuje těsně po odlití vysokou intenzitu přestupu tepla z odlitku. Kovové formy s tenčí tloušťkou stěny, tím jsou typické hutnické kokily, vykazují poněkud větší tloušťku mezery, což lze vysvětlit větším roztažením v důsledku prohřátí na vyšší teploty.

Mezera vzniká v určitém okamžiku po odlití, tj. v okamžiku ztuhnutí povrchové vrstvy odlitku a v důsledku jejího lineárního smršťování. Do této doby je tavenina s kovovou formou v těsném styku. Na obr. 3.2 je uvedena závislost teploty líce kovové formy na čase při vzniku mezery.



Obr. 3.2 Závislost teploty povrchu líce formy na čase při vzniku mezery

Výpočet času vzniku vzduchové vrstvy na základě teoretického rozboru je velmi složitý, neboť je velmi obtížné určit všechny působící činitele. Např. HAVLÍČEK [11] vypracoval na základě praktických zkušeností a empirických koeficientů vztah, kterým lze vypočítat čas vzniku vzduchové vrstvy v ocelářské kokile při určitých podmínkách odlévání.

V reálných podmínkách výroby odlitků v kovové formě se líc formy opatřuje ochranným nátěrem či nástřikem. Tím z hlediska sdílení tepla vzniká složitý systém (tvořený oxidickou vrstvou odlitku, plynovou vrstvou, nátěrem nebo nástřikem líce formy). Potom výsledný přestup tepla přes mezeru je dán komplexním součinitelem přestupu, resp. prostupu

tepla v mezeře (β), jak udává vztah (3.5) a rozložení teplot v takovém systému je schematicky znázorněno na obr. 3.1.

3.1 Tepelný přechodový odpor a součinitele prostupu tepla

Teplo prostupující z odlitku přes vzduchovou vrstvu do kovové formy je charakterizováno součinitelem prostupu tepla β . Čím je větší šířka vzduchové vrstvy, tím je vytvářen větší tepelný přechodový odpor. Přechodový odpor snižuje intenzitu prostupu tepla vzduchovou vrstvou, čím přejde méně tepla do formy, tím tuhnutí odlitku trvá delší dobu. To způsobuje nižší hodnotou součinitele prostupu tepla. Lze napsat vztah mezi tepelným přechodovým odporem mezery a součinitelem prostupu tepla:

$$TPO_M = \frac{1}{\beta} \quad (3.1)$$

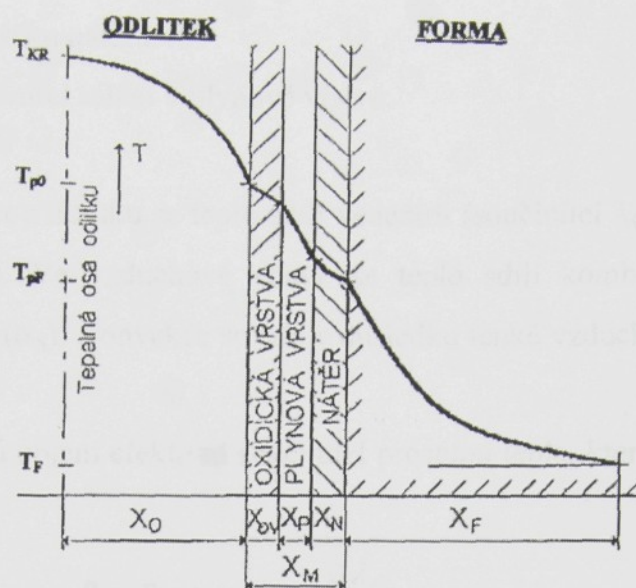
Celkový přechodový odpor (TPO_M) lze stanovit jako součet dílčích přechodových odporů jednotlivých částí tvořících mezeru: včetně počátečního přechodového odporu:

$$TPO_M = TPO_{POČ} + TPO_{OXID} + TDO_{VZ} + TPO_N \quad (3.2)$$

kde značí:

- $TPO_{POČ}$ – 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 nástřikem líce formy.

Na obr. 3.3 je uvedeno schématické naznačení soustavy odlitek – mezera – kovová forma s vyznačením jednotlivých složek tvořících mezeru.



Obr. 3.3 Schématické naznačení soustavy odlitek – mezeru – kovová forma s vyznačením jednotlivých složek tvořících mezeru

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 značí: λ_M – součinitel tepelné vodivosti mezery;

X_M – tloušťku mezery.

Jak již bylo uvedeno, největší význam má plynová vrstva. To je způsobeno tím, že její tloušťka bývá podle okolností řádově milimetry, nátěr kovové formy činí desetiny milimetrů a oxidická vrstva odlitku setiny, popř. desetiny milimetrů.

Při zahrnutí všech složek mezery lze stanovit součinitel prostupu tepla mezerou:

$$\beta_M = \frac{\lambda_{OV}}{X_{OV}} + \frac{\lambda_P}{X_P} + \alpha_S + \frac{\lambda_N}{X_N} \quad (3.5)$$

kde značí: λ_{OV} – součinitel tepelné vodivosti oxidické vrstvy odlitku;

λ_P – součinitel tepelné vodivosti plynové vrstvy;

λ_N – součinitel tepelné vodivosti nátěru (popř. nástřiku);

X_{OV} – tloušťku oxidické vrstvy odlitku;

X_P – tloušťku plynové vrstvy;

X_N – tloušťku nátěru.

α_S – součinitel sálání v plynové vrstvě.

Oxidickou vrstvou odlitku se teplo sdílí vedením (součinitel λ_{OV}). Nátěrem se teplo též sdílí vedením (λ_N). 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.

Často se používá pojem efektivní součinitel prostupu tepla, který se označuje β a lze psát:

$$\beta = \beta_M + \alpha_1 + \alpha_2 + \frac{\lambda_F}{X_F} \quad (3.6)$$

kde značí: α_1 – součinitel přestupu tepla na hranici neoxidické a oxidické vrstvy odlitku;

α_2 – součinitel přestupu tepla na hranici nátěru a kovové formy.

Součinitel β je důležitou tepelně-fyzikální veličinou pro tepelné výpočty v systému odlitek – kovová forma. Současně je třeba mít na vědomí, že v závislosti na teplotě se mění velikost mezery, ale také její charakteristické tepelně-fyzikální veličiny. To znamená, že hodnoty součinitele prostupu tepla β jsou závislé na teplotě. A pro přesné tepelné výpočty mezi odlitkem a kovovou formou nelze použít jen střední hodnotu součinitele β pokud je vůbec pro daný typ odlévání známá.

Intenzita přestupu tepla v soustavě odlitek – mezera – forma závisí na tepelných podmínkách soustavy a z rovnice tepelné rovnováhy mezi jednotlivými složkami systému lze odvodit tepelná kritéria K (pro odlitek a formu). Kritérium K je analogické s Biotovým číslem a vyjadřuje intenzitu výměny tepla přes mezeru. Kriterium K_O je pro odlitek (jeho ochlazování), K_F pro formu (její ohřev) a mají tento matematický tvar:

$$K_O = \frac{\beta \cdot X_O}{\lambda_O} = \frac{\Delta T_O}{\Delta T_M} = \frac{T_{KR} - T_{PO}}{T_{PO} - T_{PF}} [1] \quad (3.7)$$

$$K_F = \frac{\beta \cdot X_F}{\lambda_F} = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_M} = \frac{T_{PF} - T_F}{T_{PO} - T_{PF}} [1] \quad (3.8)$$

Průběh teplot v systému odlitek - mezera – forma, při různých hodnotách kritéria K_O a K_F je pak uveden na obr. 3.4.

Při vzájemném působení odlitku a formy mohou nastat tyto čtyři základní příklady:

1. $K_O < 1, K_F < 1$

Intenzita ochlazování odlitku a prohřívání formy je malá. Tento případ nastává při vysokých hodnotách λ_O a λ_F a při nízké hodnotě β , kdy mezera vykazuje svůj velký teplotní odpor.

2. $K_O < 1, K_F > 1$

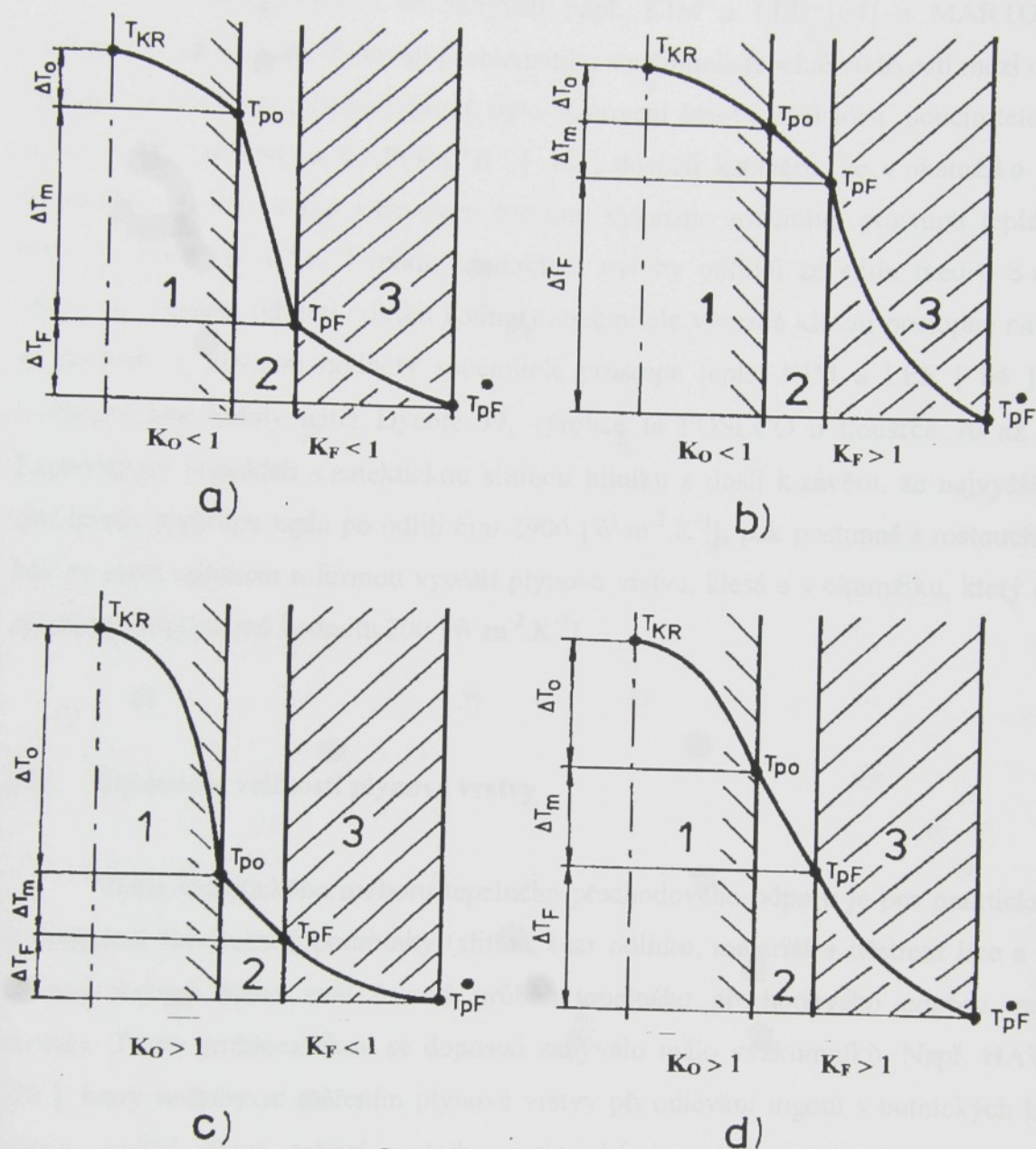
Intenzita ochlazování odlitku je malá, ale intenzita prohřívání formy je velká. Tento případ nastává při vysoké hodnotě λ_O a nízké hodnotě λ_F a při střední hodnotě β .

3. $K_O > 1, K_F < 1$

Intenzita ochlazování odlitku je velká, ale intenzita prohřívání formy je malá. Tento případ nastává při nízké hodnotě λ_O a vysoké hodnotě λ_F a při střední hodnotě β .

4. $K_O > 1, K_F > 1$

Intenzita ochlazování odlitku a prohřívání formy je velká. Tento případ nastává při nízkých hodnotách λ_O a λ_F a při vysoké hodnotě β , kdy mezera vykazuje svůj malý teplotní odpor.



Obr. 3.4 Schématické znázornění průběhu teplot v soustavě odlitek – mezera – forma při různých hodnotách K_O a K_F .

Podobně, jako v předchozí kapitole 2.1, lze analogicky zapsat vztahy pro hustoty tepelných toků. V podstatě přichází v úvahu tepelný přes oxidickou vrstvu odlitku a nátěru kovové formy a tepelný tok v plynové vrstvě na kterém se podílí, jak složka vedení, tak složka sálání. Při sálání se uplatňuje Stefan–Boltzmannův zákon.

Touto problematikou se zabývali např. KIM a LEE [64] a MARTORANO a CAPOCCHI [46], kteří sledovali problematiku součinitele tepelné vodivosti mezi odlitkem a formou a výsledkem jejich výzkumů bylo stanovení časové závislosti součinitele prostupu tepla. MARTORANO a CAPOCCHI [46] dospěli k závěru, že v okamžiku po odlití, v důsledku těsného styku s kovovou formou, vykazuje součinitel prostupu tepla hodnotu 6000 až 8000 $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ (podle charakteru výroby odlitků ze slitin mědi). S rostoucím časem, tj. s časem tuhnutí odlitku hodnoty součinitele výrazně klesají postupně na polovinu až čtvrtinu z původní hodnoty součinitele prostupu tepla. KIM a LEE [64] použili k ošetření líce kokily nátěr Dycote 39, výrobce fa FOSECO o tloušťce 70 až 100 μm . Experimenty prováděli s eutektickou slitinou hliníku a došli k závěru, že nejvyšší hodnota součinitele prostupu tepla po odlití činí 2900 $[W.m^{-2}.K^{-1}]$, pak postupně s rostoucím časem, kdy se mezi odlitkem a formou vytváří plynová vrstva, klesá a v okamžiku, který odpovídá chladnutí odlitku, má hodnotu 200 $[W.m^{-2}.K^{-1}]$.

3.2 Stanovení velikosti plynové vrstvy

Vedle teoretického rozboru tepelného přechodového odporu je pro praktické použití a konkrétní slévárenské podmínky (slitina, tvar odlitku, materiál a ošetření líce a chlazení kovové formy) nutno znát časový průběh tepelného přechodového odporu, respektive mezery. Touto problematikou se doposud zabývalo málo výzkumníků. Např. HAVLÍČEK [70], který se zabýval měřením plynové vrstvy při odlévání ingotů v hutnických kokilách, přitom použil různé měřicí metody (elektrické s využitím elektrokontaktů, elektrické kapacitní, nebo využití indukčního snímače). Při snímání vzduchové vrstvy jsou obtíže a hlavní příčinu lze spatřovat v komplikacích při konstrukci a eliminaci roztažnosti měřicí části zařízení, ale také ve snímání a registrační jednotce.

Celý pochod vzniku odlitku ve slévárenské formě až do jeho vychladnutí lze popsat třemi časovými obdobími (odlití, tuhnutí, chladnutí). Ke vzniku plynové vrstvy dochází především v době tuhnutí a chladnutí odlitku.

V době tuhnutí odlitku dochází ke vzniku a narůstání ztuhlé vrstvy odlitku od líce formy. Tato vrstva se současně smršťuje, avšak prohřívající se kokila se roztahuje. Počátek lineárního smrštění odlitku může nastat až v okamžiku vzniku dostatečně pevné ztuhlé vrstvy

odlitku. Z toho vyplývá, že ke vzniku plynové vrstvy může dojít až po určité době tuhnutí odlitku. Tloušťku plynové vrstvy v době tuhnutí odlitku lze vyjádřit:

$$X_{PVt} = X_{PV0} + X_{PVf}, \quad (3.9)$$

kde značí: X_{PV0} – tloušťku plynové vrstvy způsobené smrštěním pevné kůry tuhnoucího odlitku;

X_{PVf} – tloušťku plynové vrstvy způsobené roztažením kokily.

Obecně obě hodnoty pravé strany rovnice (3.9) mohou být vzhledem k vytváření a růstu plynové vrstvy kladné i záporné. Hodnota X_{PV0} může být např. záporná u odlitku ze slitiny vykazující předsmršťovací roztažení (litina s lupínkovým grafitem) nebo v důsledku jiných činitelů např. vysokých metalostatických tlaků nebo u slitin soustavy Fe – C, kdy dochází k fázové transformaci $\gamma \rightarrow \alpha$.

Hodnota veličiny X_{PVf} je záporná při chladnutí, resp. smršťování kokily.

Hodnoty obou veličin lze vypočítat:

$$X_{PV0} = \alpha_{LS0}^* (T_S - T_{ZKstř}) \cdot X_O, \quad (3.10)$$

$$X_{PVf} = \alpha_{LSf}^* (T_{Fstř} - T_F) \cdot X_F, \quad (3.11)$$

kde značí: α_{LS0}^* – součinitel lineárního smrštění pevné kůry odlitku [K^{-1}];

α_{LSf}^* – součinitel lineární roztažnosti materiálu kokily

T_S – teplotu solidu odlévaného kovu;

$T_{ZKstř}$ – střední teplotu ztuhlé kůry odlitku;

$T_{Fstř}$ – střední teplotu formy;

T_F – počáteční teplotu formy;

X_O – charakteristický rozměr odlitku (nejčastěji polovina odlitku);

X_F – charakteristický rozměr formy.

V době chladnutí odlitku nastává další lineární smrštění. Tloušťka plynové vrstvy při chladnutí je dána analogickým vztahem jako je (3.9):

$$X_{PVch} = X_{PchO} + X_{PchF} \quad (3.12)$$

kde značí: X_{PchO} – tloušťku plynové vrstvy vyvolané smrštěním již ztuhlé části odlitku;
 X_{PchF} – tloušťku spáry vyvolané smršťováním kokily.

Současně lze psát:

$$X_{PchO} = \alpha_{SO}^* (T_S - T_{Ostř}) X_O, \quad (3.13)$$

kde značí: α_{SO}^* – součinitel lineárního smrštění odlitku;
 $T_{Ostř}$ – střední teplotu odlitku.

Při zanedbání vlivu smrštění kokily, lze na základě rovnic (3.9) a (3.12) stanovit celkovou hodnotu šíře plynové vrstvy (X_{PV}) a lze psát:

$$X_{PV} = X_{PVl} + X_{PVch} \quad (3.14)$$

Jak je z uvedeného zřejmé, pokud sledujeme vznik plynové vrstvy mezi odlitkem a kokilou, pak je nutné brát v úvahu především tepelnou roztažnost formy, resp. změnu délky (v tomto případě délkový rozměr dutiny formy – tj. 10 [mm]) a dále lineární smrštění vznikajícího odlitku po předchozím vyplnění této dutiny formy taveninou. Velikost smršťování odlitku závisí na mnoha faktorech, jak na fyzikálních vlastnostech použité slitiny, tak na technologických podmínkách výroby odlitku – teplotě, době lití, intenzitě odvodu tepla - resp. druhu slévárenské formy, konstrukci odlitku atd. Jak je obecně známo, tuhnutí odlitku probíhá po určitých vrstvách vzdalujících se od líce formy. Hodnoty součinitele lineárního smrštění, resp. roztažení jsou uvedeny v příloze č. 8.

4. TEPELNĚ – FYZIKÁLNÍ VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ TEPELNÉ DĚJE V SYSTÉMU ODLITEK – KOVOVÁ FORMA

V této kapitole budou popsány tepelně fyzikální veličiny a koeficienty materiálů, které procesy přenosu tepla ovlivňují. Jejich znalost a správné pochopení významu je nutnou podmínkou při následném matematickém řešení teplotních dějů. Dále jejich hodnoty umožňují vytvořit si předběžnou představu o tom, jak se v daných podmínkách bude ten který materiál chovat. Podle charakteru lze tyto vlastnosti rozdělit:

1. materiálové vlastnosti

a) součinitel tepelné vodivosti materiálu (odlitku, formy): $\lambda_O, \lambda_F [W.m^{-1}.K^{-1}]$

b) měrná tepelná kapacita materiálu (odlitku, formy): $c_O, c_F [J.kg^{-1}.K^{-1}]$

2. vlastnosti odvozené z teorie přestupu tepla

a) součinitel teplotní vodivosti materiálu (odlitku, formy): $a_O, a_F [m^2.s^{-1}]$

b) součinitel tepelné akumulace materiálu formy: $b_F [W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$

Všechny tyto veličiny mění svojí velikost jak se změnou teploty, tak se změnou skupenství. Vyjádření jejich matematické závislosti na teplotě je ovšem velmi složité, a tak si v dnešních podmínkách pomáháme tím, že pro určitý teplotní interval máme experimentálními metodami zjištěné střední hodnoty.

Dalšími veličinami, které ovlivňují tepelné podmínky mezi odlitkem a formou, jsou součinitel přestupu tepla $\alpha [W.m^{-2}.K^{-1}]$ a hustota materiálu $\rho [kg.m^{-3}]$.

4.1 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost je fyzikální veličina látky, která charakterizuje její schopnost vedení tepla ve směru tepelného spádu. Tuto veličinu používáme při výpočtech vedení tepla v odlitku jak ve stavu tekutém, tak ve stavu tuhém, dále při vedení tepla ve slévárenské formě popř. v mezeře při přestupu tepla z odlitku do slévárenské formy přes tuto mezeru. Kvantitativně je tepelná vodivost množství tepla, proteklého za jednotku času jednotku isothermické plochy při teplotním spádu 1K na jednotku délky:

$$\lambda = \frac{|q|}{|gradT|} = \frac{Q.\delta}{S.t.(T_1 - T_2)} \quad (4.1)$$

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

Q - množství tepla $[J]$,

t - čas $[s]$,

S - plocha, přes kterou teplo prochází $[m^2]$,

δ - tloušťka protékané vrstvy $[m]$,

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

Součinitel tepelné vodivosti je fyzikální veličina; materiálová vlastnost tepelně vodivého prostředí. Závisí na druhu látky, hmotě, teplotě, tlaku apod. Většinou se určuje experimentálně na základě měření tepelného toku a teplotního gradientu. V idealizovaném homogenním a izotropním prostředí se často pokládá za konstantní, u některých materiálů však výrazně závisí na teplotě, v nehomogenním prostředí je funkcí polohy, v neizotropním materiálu je λ různá v různých směrech. U většiny látek má největší význam závislost λ na teplotě, kterou můžeme velmi často zjednodušeně uvažovat jako lineární:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + B(T - T_0)], \quad (4.2)$$

kde značí: λ_0 - součinitel tepelné vodivosti při teplotě T_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

B - experimentálně zjištěná materiálová konstanta [K^{-1}].

Tepelná vodivost u kovů, které nás ze zřejmých důvodů zajímají nejvíce, je největší a pohybuje se v rozmezí od 2 do 420 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Podobnou vodivost mají i ostatní pevné látky, kromě tepelně izolačních hmot, jejichž vodivost je nižší. Nižší tepelná vodivost než u pevných látek je také u kapalin a ještě o něco nižší mají tepelnou vodivost plyny.

Tepelná vodivost kovů je chápána jako superpoziční součet vodivosti prostorové mřížky pevného kovu a tepelnými vibracemi volných elektronů:

$$\lambda = \lambda_m + \lambda_e, \quad (4.3)$$

kde značí: λ_m - tepelnou vodivost prostorové mřížky [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

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

Díky tomuto faktu si můžeme blíže vysvětlit rozdíly v tepelné vodivosti u různých kovů a jejich slitin. Tepelná vodivost u čistých kovů je vždy vyšší než u jejich slitin. I když platí, že $\lambda_e \gg \lambda_m$, přesto je vždy třeba vliv tepelné vodivosti mřížky brát v úvahu. U čistých kovů, kdy je krystalická mřížka narušována pouze různými poruchami a dislokacemi, je její vodivost vyšší. U slitin je krystalická mřížka díky přítomnosti cizích atomů nehomogenní a tím se ruší její pravidelnost. To v přímém důsledku ztěžuje možnost přenášení tepelné energie a tím snižuje hodnotu součinitele tepelné vodivosti slitiny. Z tohoto důvodu mají například legované ocele nižší tepelnou vodivost než ocele uhlíkové. Obdobný je také vliv uhlíku u uhlíkových ocelí. S jeho rostoucím množstvím v oceli tepelná vodivost klesá. Obecně lze říci, že tepelná vodivost u kovů klesá s teplotou, výjimku však tvoří oceli austenitické, kde s rostoucí teplotou také roste hodnota λ . Závislost tepelné vodivosti na teplotě vybraných materiálů je uvedena v příloze této práce (v příloze č. 1 je uvedena tepelná

vodivost neželezných kovů a slitin v závislosti na teplotě a v příloze č. 2 tepelná vodivost vybraných slitin železa na teplotě a v příloze č. 3 tepelná vodivost vybraných druhů ocelí na teplotě).

Velmi složitý je náhled na vliv uhlíku v grafitických litinách. Dle výše uvedeného je zřejmé, že můžeme na grafit v matici materiálu nahlížet jako na cizorodé těleso, které narušuje homogenitu základní kovové hmoty a tím snižuje hodnotu tepelné vodivosti. Ovšem uvažujeme-li grafit samostatně, můžeme jej považovat za tepelný vodič, takže porovnáme-li litinu se srovnatelnou maticí, pak litina s hrubšími grafitem má vyšší tepelnou vodivost nežli litina s grafitem jemnějším.

U ocelí např. hodnoty λ výrazně snižuje zvyšující se procentuální obsah C, Ni, Cr atd. Proto například u vysokouhlíkových a legovaných ocelových odlitků musí být zaručeno pomalé chladnutí, aby se eliminovalo jejich možné prasknutí při rychlé změně teplot.

Zvláštním a zřejmě nejsložitějším případem pro popis a určení součinitele tepelné vodivosti ve slévárenské praxi jsou pískové formy, protože se jedná o porézní materiál, a tak je nutno uvažovat tepelnou vodivost celého tohoto systému. Tepelná vodivost je složena z vodivosti skeletu a vodivosti vzduchu v pórech. Dále je třeba uvažovat při vyšších teplotách s konvekcí plynů a par mezi zrna a při ještě vyšších teplotách s radiací v pórech. Tepelná vodivost skeletu probíhá přestupem tepla přes jednotlivá kontaktní místa zrn ostřiva. Vzhledem k tomu, že teplo musí přecházet přes hranice mezi jednotlivými zrny, musí překonat určitý tepelný odpor, je tepelná vodivost nižší než u kompaktního materiálu. Čím je vyšší měrná hmotnost materiálu, tím vyšší je jeho tepelná vodivost. Se zvětšením rozměrů porů roste tepelná vodivost. K významnějšímu nárůstu dochází při zvyšující se teplotě, kdy při teplotách nad asi 550⁰C již dochází ke zvýšení podílu přenosu konvekcí plynů a při teplotách nad asi 1100⁰C, kdy se začne projevovat radiace v pórech. Ke zvýšení tepelné vodivosti přispívají také pojiva (jíl, vodní sklo, atd.), která zvyšují dotykové plochy mezi zrny ostřiva.

4.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je fyzikální veličina materiálu, která představuje množství tepla, které musíme do systému (látky) dodat, abychom 1kg této látky ohřáli právě o 1K.

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}, \quad (4.4)$$

kde značí: m - hmotnost látky [kg],
 dQ – přírůstek množství tepla [J],
 dT - změna teploty [K].

Měrná tepelná kapacita látek se mění s teplotou dle vztahu:

$$c = A + BT + CT^2 \quad (4.5)$$

kde značí: A, B, C - materiálové konstanty empiricky zjištěné

V podstatě jde o energii, kterou mřížka odebírá z teplejšího okolí. Důsledkem je pak nejen nárůst teploty tohoto materiálu, ale i změna kmitů a chování vodivostních elektronů. Technický dopad je takový, že čím vyšší je hodnota měrné tepelné kapacity, tím pomaleji se látka ohřívá.

Tato veličina je také závislá na stavu látky (jejím skupenství). Vzájemné hodnoty těchto kapacit, pro pevný a tuhý stav, můžeme, při teplotě tavení, určit pomocí následujícího vztahu:

$$c_{tek} - c_{tuh} = \frac{L_{KR}}{T_t}, \quad (4.6)$$

kde značí: c_{tek} - měrnou tepelnou kapacitu látky ve skupenství kapalném [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 c_{tuh} - měrnou tepelnou kapacitu látky ve skupenství tuhém [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 L_{KR} – latentní krystalizační teplo [$J \cdot kg^{-1}$],
 T_t - teplotu tání materiálu [K].

Ve slévárenské praxi, kdy se tlakové poměry výrazně nemění, uvažujeme tzv. měrnou tepelnou kapacitu při stálém tlaku c_p . Někdy se vzhledem k tomuto předpokladu index p neuvádí a přesto se jedná právě o tuto kapacitu. V příloze č. 4 je uvedena závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vybraných materiálů a v příloze č. 5 vybraných ocelí.

Získání hodnoty měrné tepelné kapacity pro známé látky a kovy není tak složité. Problematictější je získání hodnot pro materiály pískových forem, která představují kapilárně pórovitá tělesa. Jednotlivé hodnoty, které jsou dostupné v literatuře se navzájem liší. Obecně však lze říci, že přímo je úměrný vliv teploty na měrnou tepelnou kapacitu látek. Čím mají látky vyšší hodnotu tepelné kapacity, tím se pomaleji ohřívají.

4.3 Součinitel teplotní vodivosti

Tato tepelně fyzikální veličina má v podstatě stejný význam jako součinitel tepelné vodivosti, pouze s tím rozdílem, že součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje stejnou vodivost při neustálených tepelných dějích. Znamená to, že se při výpočtech s použitím tohoto součinitele bere v úvahu proměnlivost teplotního pole a tepelného obsahu sledovaného objektu s časem.

Látky, které vykazují malé hodnoty a (například kapaliny, plyny) mají velkou tepelnou setrvačnost, pomaleji vyrovnávají teplotu. Naopak kovy, mající velké a , mají malou tepelnou setrvačnost a tedy rychleji vyrovnávají teplotu a tím zvětšují teplotní gradienty. Součinitel teplotní vodivosti je definován vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4.7)$$

kde značí: a - součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 λ - součinitel tepelné vodivosti [$\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ - hustotu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c - měrnou tepelnou kapacitu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Z této definice je zřejmé, že součinitel teplotní vodivosti je přímo úměrný součiniteli tepelné vodivosti a nepřímo úměrný součinu $c \cdot \rho$, což je někdy označováno jako objemová měrná tepelná kapacita. Vyjadřuje tedy, podobně jako λ pro ustálené děje, schopnost tělesa vyrovnávat teplotu ve svém objemu. Čím vyšší je teplotní vodivost materiálu, tím rychleji se v ní vyrovnávají teplotní rozdíly. Při úvahách a odhadech hodnot součinitele teplotní vodivosti u materiálů je třeba dát bedlivý pozor právě na nepřímou úměru hustoty materiálu, která je značně rozdílná a hodnotu velmi ovlivňuje.

Současně je třeba uvést, že všechny fyzikální veličiny, které se na charakteristice součinitele teplotní vodivosti podílejí (λ, ρ, c) jsou s teplotou proměnné. Tím pádem je s teplotou proměnná i hodnota součinitele teplotní vodivosti. A tuto teplotní proměnlivost je třeba při tepelných výpočtech uvažovat. Jak bylo uvedeno, hodnota součinitele tepelné vodivosti ve většině případů klesá a naopak měrná tepelná kapacita s teplotou stoupá. Z toho plyne, že s rostoucí teplotou dochází k postupnému snižování hodnoty součinitele teplotní vodivosti.

4.4 Součinitel přestupu tepla

Tato tepelně fyzikální veličina vyjadřuje množství tepla přestupujícího za jednotku času jednotkou plochy povrchu při teplotním spádu 1 K mezi oběma tělesy:

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T dS, \quad (4.8)$$

kde značí: dQ - přírůstek tepla [J],

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

ΔT - změnu teploty [K],

dS -diferenciál plochy [m^2].

Ze vztahu (4.8) je zřejmé, že součinitel přestupu tepla lze definovat:

$$\alpha = \frac{dQ}{dS \cdot \Delta T} \quad (4.9)$$

Tento součinitel je ovlivňován charakterem sdílení tepla. V době těsného dotyku dvou těles dochází k přestupu tepla vedením a konvekcí. Hodnoty součinitele přestupu tepla jsou značně komplikované veličiny závislé na mnoha faktorech jako např. rychlosti proudění taveniny, teplotách taveniny i povrchu tělesa, hustotě atd. Při odlehnutí ztuhlé vrstvičky odlitku od líc formy, ve chvíli vzniku spáry mezi odlitkem a slévárenskou formou, dochází k přestupu tepla z odlitku do formy sáláním a proto je třeba uvažovat také součinitel přestupu tepla pro sálání. To se samozřejmě týká po celou dobu přechodu tepla ze slévárenské formy do okolního prostředí. Při výpočtech přestupu tepla v době spáry je třeba pro hodnotu součinitele přestupu tepla uvažovat i součinitel přestupu tepla pro dotyk α_d a pro sálání α_s a obě dohromady nahrazovat jakousi efektivní hodnotou. Podrobnější rozbor, popis a využití tohoto součinitele bude v následujících kapitolách řešení jednotlivých výše uvedených příkladů. Je však ještě třeba předem upozornit na značné složitosti výpočtu ve chvíli použití nátěrů na líc slévárenské formy, vytvoření oxidické vrstvy na odlitku atd.

4.5 Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy

Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy b_F , také označovaný jako součinitel tepelné difuzivity, charakterizuje ochlazovací účinek slévárenské formy vůči odlitku. Proto můžeme tento součinitel odvozovat z rovnice pro přenos tepla z odlitku na formu, kdy tepelný tok z odlitku na jednotku plochy formy za dobu τ je:

$$q = - \int_0^{\tau} \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \cdot dt \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4.10)$$

Integrací tohoto vztahu (4.7) získáme celkové množství tepla přešlé z odlitku do formy za dobu τ jednotkou plochy:

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \cdot t_i \cdot \sqrt{\tau} \quad [\text{J}] \quad (4.11)$$

Výraz lze zapsat ve tvaru:

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot b_F \cdot T_{ef} \sqrt{\tau} \quad [\text{J}] \quad (4.12)$$

Z porovnání vztahů (4.8) a (4.9) je zřejmé, že výraz $\frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ je právě součinitel tepelné akumulace. Dosazením z rovnice (4.5) do výrazu $\frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ a následnými úpravami lze získat konečný vztah pro součinitel tepelné akumulace formy:

$$b_F = \sqrt{\lambda_F \cdot \rho_F \cdot c_F} \quad [\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4.13)$$

Z uvedeného vyplývá, že akumulační schopnost materiálu je množství tepla, jež materiál pojme jednotkou plochy za jednotku času při změně teploty o 1 K. Prakticky lze tuto definici aplikovat velmi jednoduše. Máme-li vedle sebe dva předměty o stejné teplotě, která je nižší než teplota našeho těla, a dotkneme se holou rukou těchto těles, pak se nám to, které má vyšší akumulační schopnost, zdá studenější.

Součinitel tepelné akumulace lze určit třemi následujícími způsoby:

- a) Vypočítání hodnoty b_F z jednotlivých veličin λ_F , ρ_F , c_F . Takto získaná hodnota však neodpovídá skutečnosti, protože bere v úvahu pouze hodnoty uváděné v literatuře. To však nemůže zohlednit podmínky ke kterým v soustavě odlitek slévárenská forma dochází.

b) Metoda elektrické analogie a numerické metody. Hodnota součinitele tepelné akumulace slévárenské formy získaná těmito metodami je velmi přesná, ovšem velmi záleží na správném stanovení počátečních podmínek a koeficientů. Nevýhodou těchto metod je však značná náročnost na vybavení.

c) Experimentální metody přímé a nepřímé. Jejich výhodou je relativně jednoduché provedení a také fakt, že vždy zohledňují dané slévárenské podmínky. Mezi tyto zkoušky patří:

- Metoda vylévací. Tato metoda je nejstarší a nejjednodušší zkouškou pro určení velikosti b_F . Jejím hlavním cílem je pomoc při studiu podmínek a postupu tuhnutí. Při jejím použití však nezískáváme příliš přesné výsledky.
- Metoda natuhávání kovu na vzorku materiálu slévárenské formy. Vzorek zhotovený z formovací směsi se na určitou dobu ponoří do taveniny a následně se po vyjmutí vzorku pomocí objemu natuhlé vrstvy určuje pomocí tepelné bilance hodnota součinitele tepelné akumulace této formovací směsi. Tato metoda (vypracovaná TAROSUTINEM) je již poměrně náročná na experiment a její výsledky také nejsou dostatečně přesné.
- Metoda kalorimetrického měření. Tuto metodu vypracoval Vetiška, který stanovil hodnotu b_F na základě měření množství tepla přijatého slévárenskou formou.
- Metoda stanovení b_F z teplotního pole formy (ANISOVIČ, GRINKEVIČ) se zakládá na tepelné rovnováze mezi odlitkem a slévárenskou formou. Musí totiž platit, že v době tuhnutí slévárenská forma akumuluje stejné množství tepla ($Q_1 = Q_2$).

VEJNIK [6] při sledování tepelných procesů ve slévárenské formě dospěl k názoru, že rozložení teplot ve stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku lze nahradit křivkou – parabolou n -tého stupně nebo sinusoidou. S touto úvahou lze také stanovit množství akumulovaného tepla slévárenskou formou.

Vyjádření vztahu pro určení součinitele tepelné akumulace formy podle VEJNIKA je uvedeno v příloze č.6. Současně je i v této tabulce přehled vztahů tepelné a teplotní vodivosti i měrné tepelné kapacity pro materiál slévárenské formy při odlévání odlitků tvaru desky a válce. U metody podle VEJNIKA je poměrně špatně zjistitelná hodnota X_2 (prohřátí vrstvy slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku), což do určité míry ovlivňuje přesnost výpočtu tepelně fyzikálních veličin.

Současně je třeba upozornit, že metoda podle VEJNIKA měla velký význam v době, kdy nebyla dostupná výpočetní technika a bylo nutno stanovovat tepelné podmínky mezi odlitkem a formou, především vše co souviselo s určením doby tuhnutí odlitku. V současné době rozvoj výpočetní techniky a s tím spojená aplikace numerických metod dává možnosti řešení složitých diferenciálních rovnic, které popisují tepelné poměry mezi odlitkem a formou a pomocí nichž lze dosáhnout výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků v příslušných slévárenských formách.

Metoda odlévání. Podstatou je měření doby tuhnutí pokusného odlitku, kdy se t_F stanoví po dosažení naměřených hodnot výpočtem ze vztahů pro dobu tuhnutí, které jsou odvozeny podle HALBARTA a VEJNIKA z teorie tuhnutí. Jejich vztahy jsou odvozeny z rovnice tepelné bilance při nestacionárním vedení tepla. VEJNIK rozdělil celý proces tvorby odlitku ve formě na tři etapy: odvod tepla v době lití a plnění slévárenské formy taveninou, odvod tepla přehřátí taveniny a konečně odvod tepla krystalizačního. Odvod tepla při chladnutí odlitku již zanedbává.

4.6 Fyzikální veličiny odlévaného kovu

Vedle tepelně-fyzikálních veličin materiálu slévárenských forem jsou důležité i fyzikální vlastnosti kovů a jejich slitin. Mají základ ve stavbě hmoty, závisí na stavbě atomů jednotlivých kovů, a proto mají stálou hodnotu. Mění-li se některé fyzikální vlastnosti podle stavu kovu (např. s teplotou), jsou to změny zákonité a vratné, pokud nenastanou změny v uspořádání atomů či molekul hmoty.

U čistých kovů mají fyzikální vlastnosti stálou velikost za normálních podmínek, mění se však, někdy i dost výrazně, i nepatrnými přísadami jiných prvků.

Fyzikální vlastnosti slitin závisí na složení slitiny. U slitin dvou nebo více komponent udáváme fyzikální vlastnosti jako funkci složení slitiny nebo obsahu některého kovu v ní.

Nejdůležitější fyzikální vlastnosti charakterizující chování odlévaného kovu, které výraznou měrou ovlivňují průběh procesu tuhnutí a chladnutí odlitku, jsou:

- **měrná hmotnost (hustota) ρ [kg .m⁻³]** - je hmotnost látky obsažené v objemové jednotce. V technické praxi se hustota látky určuje hmotností 1 m³ látky za normální teploty a tlaku. U technických kovů záleží měrná hmotnost na jejich složení, čistotě a na způsobu zpracování. Nečistoty snižují měrnou hmotnost. S rostoucí teplotou

měrná hmotnost klesá (kov se roztahuje); do roztavení ρ klesá plynule, při roztavení ρ klesá skokem.

- **měrná tepelná kapacita v tuhém stavu c_s [J.kg⁻¹.K⁻¹]** - udává množství tepla, jímž se ohřeje 1 kg tuhé látky o 1 K.
- **měrná tepelná kapacita v kapalném stavu c_L [J.kg⁻¹.K⁻¹]** - udává množství tepla, jímž se ohřeje 1 kg taveniny o 1 K.
- **latentní krystalizační teplo L_{KR} [J.kg⁻¹]** - je teplo, které je zapotřebí odvést 1 kg kovu, aby změnil své skupenství (krystalizoval). Toto teplo ovlivňuje celkové množství odvedeného tepla z odlitku do slévárenské formy.
- **kinematická viskozita ν [m².s⁻¹]** - udává míru tekutosti kapalné fáze. S klesající teplotou viskozita stoupá, čímž se zhoršuje zabíhavost, a určí se:
$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

[m².s⁻¹] (η - dynamická viskozita taveniny [kg.m⁻¹.s⁻¹], ρ - měrná hmotnost taveniny [kg .m⁻³]).
- **teplota krystalizace T_{KR} [K]** - udává teplotu, při níž dochází ke změně skupenství
- **teplota lití T_l [K]** - udává teplotu, při níž je kov odléván. Je to teplota kovu v pánvi těsně před okamžikem lití. Oproti T_{KR} je zvýšena o míru přehřátí taveniny.

5. CHARAKTERISTIKA KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM (KOKIL)

Kovové formy (kokily) patří spolu s grafitovými formami mezi základní dva typy trvalých forem, jak uvádí PÍŠEK a PLEŠNER [65]. Pod pojmem trvalá forma rozumíme formu vyrobenou z takového materiálu, který umožní odlít v jedné a téže formě stovky, tisíce, ba i statisíce odlitků. Oba zmíněné druhy trvalých forem mají své výhody a nevýhody, avšak běžněji se používají kokily.

Kokily se vyznačují:

1. mají vysokou tepelnou akumulaci, a tak dobře odvádí z odlitku teplo, čímž odlitek získává jemnozrnnou strukturu a lepší mechanické vlastnosti
2. mají dobrou teplotní a tepelnou vodivost
3. zvyšuje se tvarová i rozměrová přesnost odlitků (odlévání tvarově složitých odlitků)
4. zlepšuje se povrch odlitků - jakost

Výroba do kokil však na druhou stranu naráží na řadu potíží:

1. obtížná konstrukce a metodika pro výpočet vtokové soustavy
2. nákladná změna postupu odlévání; období zavádění lití do kokil je často doprovázeno zvýšením zmetkovosti
3. mechanické vlastnosti se mění s měnícím se průřezem odlitku více než u lití do písku
4. formy se musí ošetřovat ochranným nátěrem popřípadě nástřikem
5. každá kokila musí být předeřhřátá na pracovní teplotu, která závisí na odlévaném materiálu, jinak hrozí vznik závalů
6. kovové formy mají vyšší pořizovací náklady

5.1 Životnost kovových slévárenských forem

Během procesu odlévání je kovová slévárenská forma namáhána třemi základními druhy namáhání: tepelným, mechanickým, chemickým.

Životnost kovových slévárenských forem je úzce spojena s **tepelným namáháním** povrchu pracovní části kokily (líce), který podléhá působení vysokých teplot při styku s roztaveným kovem a tepelným rázům. Při odlévání je to rychlý ohřev, po vyjmutí ochlazení. Proto musí být materiál kokil odolný proti vysoké teplotě, rychlým změnám teploty i proti objemovému růstu, který je typický pro litinovou kokilu.

Kovové formy jsou namáhány především tepelnou únavou povrchu kovových forem. Dojde k tomu tím, že více ohřátý líc formy, jež je ve styku s roztaveným kovem, se oproti chladnějšímu vzdálenějšímu místu formy více roztahuje, ve formě tak vznikají velké teplotní gradienty. Tím pádem je líc formy namáhán na tlak oproti vzdálenějším vrstvám materiálu formy, které jsou namáhány naopak na tah. Při ochlazování nastává pravý opak. V obou případech, vlivem teplotních cyklů, se v důsledku toho na povrchu kovové formy po určitém množství lících cyklů objeví drobné trhlinky, které se postupně zvětšují, zhoršují vzhled odlitků, až jsou nakonec tak velké, že do nich kov zatéká a odlitek lze jen s velkými obtížemi vyjmout. Této síti trhlin se říká „mapování“. Při výběru materiálu formy se musíme snažit uvedené jevy kompenzovat vlastnostmi materiálu. Především je třeba volit materiál s malým součinitelem tepelné roztažnosti, protože se tím snižuje velikost vznikajících napětí a zvyšuje se životnost kovové formy. Rovněž tepelná vodivost materiálu kokily má nemalý vliv. Vyšší součinitel tepelné vodivosti znamená nižší tepelně mechanické namáhání.

Mechanické namáhání je způsobeno především tlakem roztaveného kovu a to zejména u tlakového lití. Líc formy je pak účinkem proudícího roztaveného kovu erozivním způsobem destruován. Tento případ namáhání se vyskytuje zvláště u vysokotlakého lití.

K **chemickému namáhání** kokil (zvláště při odlévání chemicky agresivních látek) dochází vlivem vzájemných chemických reakcí mezi roztaveným kovem a formou, jejíž líc je pokryt tenkou vrstvou oxidů. Tato vrstvička oxidů disponující jinou (menší) tepelnou dilatací, než vlastní kovová hmota formy, se časem odlupuje od líce formy a tím ji porušuje. Použitím ochranných žáruvzdorných nátěrů na lici formy a snížením teploty lití lze částečně omezovat chemické působení na formu.

5.2 Materiál kovových slévárenských forem

Materiál kokil musí být odolný proti vysoké teplotě, proti cyklickým teplotním změnám i proti objemovému růstu. Dále musí dobře akumulovat tepelnou energii z odlitku a následně ji rozvádět do svého objemu, respektive okolí. Materiál kokily by měl také vykazovat velké hodnoty tepelné a teplotní vodivosti, čímž se ve formě snáz vyrovnávají teploty. Pokud má materiál formy navíc nižší hodnoty Youngova modulu pružnosti E , snižují se tak ve formě pnutí, která vznikají vlivem teplotní roztažnosti a forma tak vykazuje lepší plastické vlastnosti. Materiál, který vykazuje nízké hodnoty E , a je tím pádem vhodný k výrobě kokil, je litina ($E = 1,2 \cdot 10^5$ MPa). Ocel není moc vhodná, neboť má vyšší hodnotu E ($E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa) a při tepelném namáhání se více „bortí“ než litina. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu kokil je tedy litina, nejlépe litina s lupínkovým grafitem (LLG) feriticko-perlitické struktury bez stop volného cementitu. Množství feritu ve struktuře nesmí převyšovat 5 -10 %. Takové kokily se používají pro gravitační a nízkotlaké lití.

Kromě LLG se na výrobu kokil používá také litina s kuličkovým grafitem (LKG). Kokily z tohoto materiálu mají sice asi o 30 % větší životnost, ale zhruba o tutéž hodnotu vyšší výrobní náklady. Jejich využití tedy brání zejména nedostatek LKG u nás.

Nevýhodou litiny je, že při cyklickém zahřívání a ochlazování (nad $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) trpí tzv. **růstem litiny**. Je to vada, kdy litina jakoby „bobtná“ neboli zvětšuje svůj objem až o hodnoty 30 až 50 %, a která vzniká hlavně v tepelně namáhané části formy.

Pro tenkostěnné litinové kokily volíme měkčí strukturu, neboť je méně náchylná na praskání (struktura má vysoké plastické vlastnosti), ale je více náchylná na mapování. Pro tlustostěnné litinové kokily volíme naopak tvrdší strukturu, protože je méně náchylná na

praskání, i když více náchylná na mapování. K mapování přispívá oxidace a na oxidaci je náchylný ferit, a proto se dává více struktury perlitické.

Další nevýhodou litiny (LLG) je, že se nehodí pro vysokotlaké lití, neboť obsahuje grafit, který se právě vysokotlakým způsobem lití vymílá na líci formy, čímž povrch získává určitou drsnost. Proto se na takový způsob lití používá hlavně ocel. Ocel je dalším z materiálů používaných na výrobu kokil. Používá se řada uhlíkových a nízkolegovaných ocelí, nejčastěji to je nástrojová ocel třídy 19 (19551, 19552 apod.), která dobře snáší cyklické namáhání za vysokých teplot.

Např. v Auto ŠKODA Mladá Boleslav se pro gravitační lití hlav spalovacích motorů ze slitin hliníku používají kokily z oceli ČSN 19 552.

5.3 Předehřev kovových slévárenských forem

Provozní teplota kokily při lití odlitků je velmi důležitá z hlediska metalurgického i z hlediska jakosti a životnosti kokil. Předehřevem se snižuje teplotní spád mezi kokilou a taveninou, čímž je forma méně tepelně namáhána (prodlužuje se jí tak životnost), zvyšuje se zabíhavost taveniny a prodlužuje se doba tuhnutí a chladnutí odlitku. Při nízké teplotě kokily hrozí nebezpečí nezaběhnutí roztaveného kovu (závaly = stopy proudění taveniny = jakési rýhy se zaoblenými hranami, kdy proud roztaveného kovu se ještě nestačil rozprostřít po líci formy a utuhnul dříve), popřípadě i vznik trhlin nebo prasklin u tvarově složitých odlitků. Naproti tomu příliš vysoká teplota kokily má za následek prodloužení doby krystalizace odlitku, což následně způsobuje větší hrubost odlitku; a příliš vysoká teplota také předčasné znehodnocuje kokilu. Správná provozní teplota kokily závisí na druhu odlévaného materiálu. Obecně by taková teplota měla být větší než 100 °C, neboť používané ochranné nátěry jsou na bázi vody a ta (voda) se pak může při takové teplotě vyloučit odpařením, aby se nedostala do odlitku.

Pro odlévání hliníkových slitin má být teplota 150 až 200 °C, pro LLG 200 až 270 °C. Při lití odlitků z LLG nemá teplota kokily přestoupit 300 °C, protože se prudce zhoršuje jakost povrchu odlitků.

Z hlediska životnosti kokil má docházet k co nejmenším tepelným změnám při provozu. Proto po každém časovém přerušení lití je nutno kokilu pozvolna ohřát na spodní

hranici provozní teploty. Naprosto nesprávný ohřev kokily je nalitím tekutého kovu do studené kokily, protože pak dochází k prudkému tepelnému nárazu a namáhání kokily.

Udržování správné provozní teploty kokily znamená i její chlazení během výroby. Chlazení může být vzduchové nebo vodní. Vzduchové chlazení se používá v menších slévárnách, jinak se přechází na chlazení vodní. Může být volné nebo nucené. Volné vzduchové chlazení je málo intenzivní a používá se jen u tenkostěnných odlitků. Při vodním chlazení se má dbát na tzv. tepelné vyvážení kokily, tj. na intenzivnější ochlazování těch částí kokily, které jsou nejvíce tepelně namáhány (vtoková soustava, místa s velkou tloušťkou stěn odlitku apod.).

5.4 Nátěr kovových slévárenských forem

K prodloužení životnosti kokil se používají dva druhy nátěrů, jak uvádí PÍŠEK a PLEŠINGER [65] žáruvzdorné nátěry a barviva.

Vrstva nátěru působí při přestupu tepla mezi odlitkem a formou jako tepelný odpor. Tím se snižuje intenzita přestupu tepla, čímž se následně snižuje teplotní spád v dané soustavě odlitek - forma potažmo cyklické tepelné namáhání formy. Dalším kladem nátěru je, že snižuje akumulaci schopnost formy, což zlepšuje zabíhavost tekutého kovu.

Vrstva nanášeného nátěru popřípadě nástřiku by měla být stejné tloušťky a co nejcelistvější, což je podmíněno předešlou povrchovou přípravou (čištěním) míst na lici formy, aby bylo zajištěno dokonalé přilnutí nanášené látky na ní. Čištění se provádí broušením, kartáčováním, odmašťováním apod. Dále by měla nanášená látka splňovat tepelnou, mechanickou a chemickou odolnost vůči odlévanému kovu. Tepelná odolnost musí být zaručena obecně vždy, mechanická odolnost navíc např. u vysokotlakého lití a chemická zase u odlévaných chemicky agresivních materiálů.

Složení nátěru se mění jednak podle materiálu kokily a jednak podle samotného odlévaného kovu. Nátěr tvoří heterogenní soustavu, která se skládá z pojiva, ostřiva, nosné kapaliny a přídavných látek. Druh a chemická povaha pojiva určují tepelnou odolnost daného nátěru. Ostřivo bývá charakteru teplovodného nebo izolačního a jeho volba závisí na druhu odlévaného kovu. Teplovodná ostřiva intenzivně vedou teplo a jsou zpravidla na bázi grafitu. Naproti tomu izolační ostřiva zpomalují chladnoucí proces, brání výměně tepla, aby se zvýšila zabíhavost taveniny. Nosná kapalina, nebo také plastifikátor, urychluje vytvrzovací proces daného nátěru. K tomu dochází při vysokých teplotách, kdy je z toho důvodu kokila s

nátěrem umístěna do pece či sušárny. Plastifikátorem bývá nejčastěji voda. Potom musí být forma předem (před nanášením nátěru na líc formy) ohřívána na teploty vyšší, než 100 °C, aby bylo zajištěno dostatečné odpaření dané vody. Přídavné látky zlepšují technologické vlastnosti nátěrových hmot, jako smáčivost či přilnavost k povrchu.

V současné době existuje celá řada nástřiků nebo nátěrů, které jsou známé pod různým obchodním označením jako např. DICOTE 5, DICOTE 32, DICOTE 39 od firmy Foseco nebo nátěry pod označením CILLOLIN nebo METALSTAR od firmy Schäfer. Tyto nástřiky nebo nátěry jsou ve slévárenství velmi používané, avšak výrobci bližší informace o nich zásadně neuvádějí.

6. ZAHRNUTÍ VLIVU TEPELNÉHO PŘECHODOVÉHO ODPORU DO VÝPOČTŮ TEPELNÝCH DĚJŮ SYSTÉMU ODLITEK – KOVOVÁ FORMA S VYUŽITÍM NUMERICKÉ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků je jednou z velmi rozšířených numerických metod, kterou lze dobře uplatnit na počítači. Výpočet metodou konečných prvků obsahuje velké množství algebraických operací, prováděnými rozsáhlými datovými soubory. Nezbytným předpokladem pro studium metody konečných prvků je znalost maticového počtu. S použitím matic lze výpočtový postup zapsat stručně a přehledně, což usnadňuje porozumění sledované problematiky. Maticový zápis také dobře vyhovuje s ohledem na strukturu paměti počítače, při ukládání, výběru a zpracování dat.

6.1 Rozpracování metody konečných prvků pro řešení teplotních polí [38]

V této části práce je naznačeno rozpracování metody konečných prvků pro řešení teplot sledované soustavy (odlitku nebo slévárenské formy). Charakteristika této metody je popsána v kapitole 2.3. Jak je uvedeno, základním principem této metody je rozdělení sledované oblasti na konečný počet jednoduchých „konečných prvků“, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem na svých hranicích spojeny v konečný počet uzlových bodů. Skutečný průběh sledované fyzikální veličiny (v našem případě teploty) uvnitř prvku aproximujeme při řešení zvolenou funkcí, která musí být jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech. Hodnoty fyzikální veličiny v uzlových bodech jsou pak

základní neznámé parametry řešení. Výpočtem těchto parametrů je určen průběh fyzikální veličiny v dané oblasti. Typickou vlastností této metody je, že průběh hledané fyzikální veličiny se určuje z podmínky minima jistého funkcionálu.

Toho principu lze použít při řešení teplotního pole uvedenou metodou. Při vyšetřování teplotního pole touto metodou je postupováno s využitím Eulerova teorému, kdy je využito prvků ve tvaru čtyřtětů.

Jak je obecně známo, pro nestacionární podmínky sdílení tepla je teplota T funkcí polohy a času $T = T(x, y, z, t)$ a teplotní pole je popsáno diferenciální rovnicí:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (6.1)$$

kde značí: c_p - měrnou tepelnou kapacitu materiálu;

ρ - hustotu materiálu;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - tepelnou vodivost materiálu v jednotlivých směrech;

Q - tepelný výkon vnitřních zdrojů..

Rovnice (6.1) popisuje nestacionární teplotní pole pro anizotropní materiál s vnitřními zdroji energie. Nestacionární podmínky sdílení tepla v rovnici (6.1) představuje člen $c_p \rho (\partial T / \partial t)$. Hodnotu tohoto členu lze považovat za předepsanou funkci polohy.

Pro úspěšné řešení rovnice (6.1) je nutno formulovat počáteční a okrajovou podmínku:

1) Počáteční podmínku charakterizuje teplotní pole tělesa v okamžiku $t = 0$, což lze vyjádřit:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z).$$

2) Okrajová podmínka - na povrchu vyšetřované oblasti platí podmínka 3. druhu:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q + \alpha T = 0, \quad (6.2)$$

kde značí: l_x, l_y, l_z - směrové kosiny normály k povrchu;

q - měrný tepelný tok na povrchu oblasti;

α - součinitel přestupu tepla.

Jak je z variačního počtu obecně známé, lze řešenou úlohu formulovat také podmínkou minima určitého integrálu (funkcionálu). Podle Eulerova teorému je nutná a postačující podmínka pro existenci extrému integrálu $I(u)$:

$$I(u) = \iiint_V f(x, y, z, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}) dydzdx \quad (6.3)$$

je, aby neznámá funkce $u(x, y, z)$ splňovala v téže oblasti diferenciální rovnici:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)} \right] - \frac{\partial f}{\partial u} = 0 \quad (6.4)$$

za předpokladu stejných okrajových podmínek v obou případech. Je také zřejmé, že rovnici (6.1) dostaneme také, provedeme-li s funkcionálem úkony naznačené v rovnici (6.4). Podle Eulerova teorému ekvivalentní formulace k rovnici (6.1) je vyjádření podmínky minima objemového integrálu $\Phi(T)$ pro dané okrajové podmínky pro teplotu (T). Tento funkcionál pro nestacionární podmínky sdílení tepla má tvar:

$$\Phi(T) = \iiint_V \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \iiint_V \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right) T dx dy dz \quad (6.5)$$

Při zahrnutí výše uvedené okrajové podmínky do rovnice (6.5) získáme rozšířený tvar funkcionálu o jeden člen a lze psát:

$$\begin{aligned} \Phi(T) = & \iiint_V \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \iiint_V \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right) T dx dy dz \\ & + \iint_S \left\{ \frac{1}{2} \alpha (T - T_0)^2 + q T \right\} dS \end{aligned} \quad (6.6)$$

kde značí: S – povrch, na kterém je udán tepelný tok nebo součinitel přestupu tepla.

Pro technickou aplikaci je často rovnice (6.6) rozpracována do tohoto tvaru

$$\begin{aligned} \Phi(T) = & \iiint_V \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \iiint_V \left[Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right] T dx dy dz + \\ & + \frac{1}{2} \iint_S \left\{ \alpha (u, v) T^2 - q(u, v) T \right\} du dv \end{aligned} \quad (6.7)$$

kde značí: V - objem tělesa;

S - plochu tělesa, kterou je předáváno teplo z odlitku do formy;

T - teplotu;

x, y, z - souřadnice;

ρ - hustotu;

c_p - měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku;

Q - tepelný výkon vnitřních zdrojů;

u, v - souřadnice sledovaného místa plochy;

α - součinitel přestupu tepla;

q - hustotu tepelného toku.

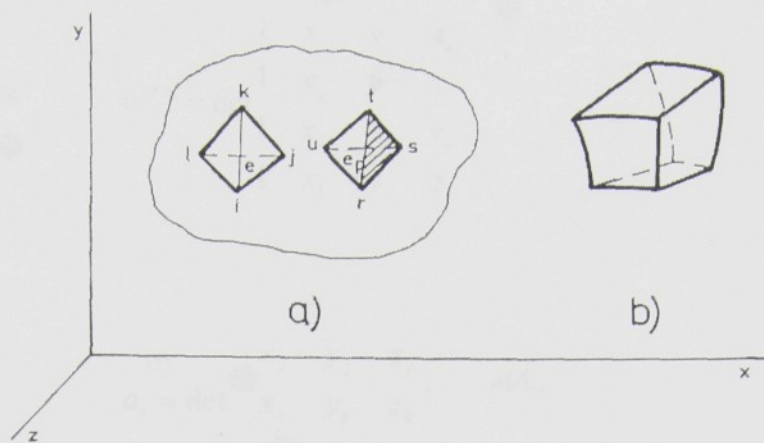
Pro další řešení uvažujeme oblast rozdělenou rovinnými řezy na prvky e tvaru čtyřstěnu s vrcholy v uzlových bodech i, j, k, l (viz obr.6.1). Pravoúhlé souřadnice uzlových bodů lze označit (x_i, y_i, z_i) a teploty v uzlových bodech T_i, T_j, T_k, T_l . Sloupcovou matici teplot ve vrcholech e -tého čtyřstěnu lze označit $\{T\}^e$ a tu lze zapsat v závislosti s teplotami v uzlových bodech:

$$\{T\}^e = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \\ T_l \end{Bmatrix} \quad (6.8)$$

Teplotu v obecném bodě čtyřstěnu e lze v závislosti na teplotách v uzlových bodech vyjádřit vztahem:

$$T = \left[\{N\}^e \right]^T \{T\}^e \quad (6.9)$$

kde značí: $\{N\}^e$ – sloupcovou matici tvarových funkcí.



a) dělení prostoru na jednotlivé prvky - čtyřstěny
b) izoparametrický prostorový prvek

Obr. 6.1 Dělení sledovaného objektu na jednoduché prvky tvaru čtyřstěnu

Sloupcovou matici tvarových funkcí lze zapsat ve tvaru:

$$\{N\}^e = \begin{Bmatrix} \frac{N_i}{N_j} \\ \frac{N_k}{N_l} \end{Bmatrix} \quad (6.10)$$

Matice tvarových funkcí (6.10) mají tu vlastnost, že platí:

$$N_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1 & \text{pro } i = j \\ 0 & \text{pro } i \neq j \end{cases} \quad (6.11)$$

$[\{N\}^e]^\Theta$ je matice transponovaná. Za předpokladu lineární závislosti teploty T uvnitř prvku na souřadnicích x, y, z je N_i .

$$N_i = \frac{1}{6V^e} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (6.12)$$

$$6V^e = \det \begin{pmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

$$a_i = \det \begin{pmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{pmatrix}, \quad \text{atd.}, \quad (6.14)$$

$$b_i = -\det \begin{pmatrix} 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{pmatrix}, \quad \text{atd.}, \quad (6.15)$$

$$c_i = \det \begin{pmatrix} 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{pmatrix}, \quad \text{atd.}, \quad (6.16)$$

$$d_i = -\det \begin{pmatrix} 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{pmatrix}, \quad \text{atd.}, \quad (6.17)$$

Předpokládá se, že funkce T je v prvku spojitá a jednoznačná. Uzlové hodnoty teplot T definují jednoznačně funkci T v celé oblasti a funkcionál $\Phi(T)$ může být vzhledem k hodnotám uzlových bodů minimalizován.

V dalším postupu se vyjádří nejprve podmínky funkcionálu $\Phi(T)$ pro všechny uzlové body jednoho prvku, pak následuje sestavení sloupcové matice podmínek minima pro tento prvek. Proces se opakuje pro všechny prvky dané oblasti, přičemž se provedou součty přes celou vyšetřovanou oblast. Sčítají se odpovídající veličiny, příslušné určitému uzlu a součty se položí rovny nule.

Pro uzlový bod i, příslušející prvku e bude podmínka minima funkcionálu $\Phi(T)^e$ tento tvar:

$$\frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_i} = \iiint_V \left[\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx.dy.dz \quad (6.18)$$

Lze vyjádřit teplotu T v prvku e vztahem (6.9) s použitím rovnic (6.10) až (6.17) a tím získat vztahy:

Pro uzel i:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_i} = \frac{1}{(6V^e)^2} \iiint_V & \left([\lambda_x [b_i, b_j, b_k, b_l] b_i + \lambda_y [c_i, c_j, c_k, c_l] c_i + \right. \\ & \left. + \lambda_z [d_i, d_j, d_k, d_l] d_i \right) \{T\}^e dx.dy.dz \end{aligned} \quad (6.19a)$$

Analogickým způsobem lze vyjádřit podmínku minima funkcionálu $\Phi(T)^e$ vzhledem k teplotám ostatních uzlů (j,k,l) prvku e. A získáme vztahy:

Pro uzel j:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_j} = \frac{1}{(6V^e)^2} \iiint_V & \left([\lambda_x [b_i, b_j, b_k, b_l] b_j + \lambda_y [c_i, c_j, c_k, c_l] c_j + \right. \\ & \left. + \lambda_z [d_i, d_j, d_k, d_l] d_j \right) \{T\}^e dx.dy.dz \end{aligned} \quad (6.19b)$$

Pro uzel k:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_k} = \frac{1}{(6V^e)^2} \iiint_V & \left([\lambda_x [b_i, b_j, b_k, b_l] b_k + \lambda_y [c_i, c_j, c_k, c_l] c_k + \right. \\ & \left. + \lambda_z [d_i, d_j, d_k, d_l] d_k \right) \{T\}^e dx.dy.dz \end{aligned} \quad (6.19c)$$

Pro uzel l:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_l} = \frac{1}{(6V^e)^2} \iiint_V & \left([\lambda_x [b_i, b_j, b_k, b_l] b_l + \lambda_y [c_i, c_j, c_k, c_l] c_l + \right. \\ & \left. + \lambda_z [d_i, d_j, d_k, d_l] d_l \right) \{T\}^e dx.dy.dz \end{aligned} \quad (6.19d)$$

Pak lze shrnout podmínky (6.19a) až (6.19d) do jednoho výrazu a lze psát:

$$\left\{ \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_i} \\ \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_j} \\ \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_k} \\ \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_l} \end{array} \right\} \quad (6.20)$$

Současně lze $\{\partial \Phi(T)^e / \partial T\}$ zapsat pomocí matice $[h]^e$ a sloupcové matice teplot e-tého čtyřstěnu $\{T\}^e$:

$$\left\{ \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T} \right\} = [h]^e \{T\}^e. \quad (6.21)$$

Matici $[h]^e$ lze vyjádřit:

$$[h]^e = \begin{bmatrix} h_{ii}^e & h_{ij}^e & h_{ik}^e & h_{il}^e \\ h_{ji}^e & h_{jj}^e & h_{jk}^e & h_{jl}^e \\ h_{ki}^e & h_{kj}^e & h_{kk}^e & h_{kl}^e \\ h_{li}^e & h_{lj}^e & h_{lk}^e & h_{ll}^e \end{bmatrix} = \frac{\lambda_X}{36V^e} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_j b_i & b_k b_i & b_l b_i \\ b_i b_j & b_j b_j & b_k b_j & b_l b_j \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k b_k & b_l b_k \\ b_i b_l & b_j b_l & b_k b_l & b_l b_l \end{bmatrix} + \quad (6.22)$$

$$+ \frac{\lambda_Y}{36V^e} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_j c_i & c_k c_i & c_l c_i \\ c_i c_j & c_j c_j & c_k c_j & c_l c_j \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k c_k & c_l c_k \\ c_i c_l & c_j c_l & c_k c_l & c_l c_l \end{bmatrix} + \frac{\lambda_Z}{36V^e} \begin{bmatrix} d_i d_i & d_j d_i & d_k d_i & d_l d_i \\ d_i d_j & d_j d_j & d_k d_j & d_l d_j \\ d_i d_k & d_j d_k & d_k d_k & d_l d_k \\ d_i d_l & d_j d_l & d_k d_l & d_l d_l \end{bmatrix}$$

Objem V^e je dán vztahem (6.13).

Pro řešení sledované problematiky je ještě nutno sestavit a vyjádřit celkové matice. Podobně jako jsou vyjádřeny podmínky minima funkcionálu pro uzlové body prvku e, lze vyjádřit i obdobné podmínky pro uzlové body ostatních prvků sledované oblasti. Výrazy odpovídající příslušnému uzlovému bodu se pak sečtou a vyjádří se výsledné podmínky.

Pro i-tý uzel lze podmínky zapsat takto:

$$\frac{\partial \Phi(T)}{\partial T_i} = \sum_m \frac{\partial \Phi(T)^e}{\partial T_i} = \sum_m \sum_n h_{i,m}^e T_{m,j}, \quad (6.23)$$

kde značí: m – index uzlových bodů prvků, které se stýkají v bodě i .

Je-li oblast tvořena n uzlovými body, pak lze napsat n podobných rovnic, které v maticovém zápisu mají tvar:

$$[H] \{T\} = 0 \quad (6.24)$$

kde značí: $[H]$ – pásovou matici typu $(n \times n)$ s prvky $h_{ij} = \sum h^e_{ij}$;
 $\{T\}$ - sloupcovou matici $(n \times 1)$.

Při řešení nestacionárního teplotního pole lze rovnici (6.9) vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = [\{N\}^e]^{\ominus} \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e \quad (6.25)$$

V podmínce minima funkcionalu $\Phi(T)^e$ pro i -tý uzlový bod prvku e , tj. ve výrazu $\partial \Phi(T)^e / \partial T_i$ přibude člen, který např. označíme F^0_i , pak lze psát:

$$F^0_i = \iiint_V c \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial T_i} .dx.dy.dz = \iiint_V c [\{N\}^e]^{\ominus} \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e N_i .dx.dy.dz \quad (6.26)$$

Do sloupcové matice (6.21) podmínek minima pro všechny uzlové body prvku e je nutno ještě zahrnout člen:

$$\{F^0\}^e = \begin{Bmatrix} F^0_i \\ F^0_j \\ F^0_k \\ F^0_l \end{Bmatrix} = \iiint_V c [\{N\}^e]^{\ominus} \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e \{N\}^e .dx.dy.dz = \left(\iiint_V c [\{N\}^e]^{\ominus} \{N\}^e .dx.dy.dz \right) \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e \quad (6.27)$$

Vztah (6.27) lze pro jednoduchost zapsat:

$$\{F^0\}^e = [p] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^e \quad (6.28)$$

kde značí: $[p]$ – skalární veličinu pro daný prvek.

Skalární veličinu prvku jak vyplývá ze vztahu (6.27) lze zapsat:

$$[P] = \iiint_V c[\{N\}^e]^T \{N\}^e .dx.dy.dz \quad (6.29)$$

Výsledný vztah pro i -tý uzlový bod prvku při nestacionárních podmínkách teplotního pole je proti vztahu (6.23) obohacen o poslední člen:

$$\frac{\partial \Phi(T)}{\partial T_i} = \sum_m \sum_n h_{i,m}^e T_{m,j} \sum_m \sum_j P_{i,m}^e \frac{\partial T_{m,j}}{\partial t} \quad (6.30)$$

Pro všechny uzlové body oblasti napíšeme soustavu n rovnic v maticovém zápisu ve tvaru:

$$[H]\{T\} + [P]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = 0 \quad (6.31)$$

Hodnota $\{\partial T/\partial t\}$ není předem známá. Při řešení lze postupovat různým způsobem. Např. tak, že čas rozdělíme na krátké časové úseky Δt v nichž je předpokládán lineární průběh teploty v závislosti na čase, lze psát :

$$\frac{\{T\}_t - \{T\}_{t-\Delta t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t} + \left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_t \right) \quad (6.32)$$

Z rovnice (6.32) lze vyjádřit:

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_t = -\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t} + \frac{2}{\Delta t} (\{T\}_t - \{T\}_{t-\Delta t}) \quad (6.33)$$

Po dosazení vztahu (6.31) do rovnice (6.33) získáme vztah:

$$\left([H] + \frac{2}{\Delta t} [P] \right) \{T\}_t = [P] \left(\frac{2}{\Delta t} \{T\}_{t-\Delta t} + \left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t} \right) \quad (6.34)$$

Ze soustavy rovnic, které mají v maticovém zápisu tvar (6.34), je možno vypočítat hodnoty $\{T\}$ v okamžiku t za předpokladu, že známe $\{T\}$ a $\{\partial T/\partial t\}$ v okamžiku $t - \Delta t$. Pro první krok výpočtu je obvykle známo rozložení teploty v počátečním okamžiku, tedy $\{T\}_{t=0}$.

Zde je poměrně podrobně naznačen matematicky velmi náročný postup řešení. V technické praxi se často při řešení nestacionárních tepelných dějů se setkáváme pouze s obecným zápisem obecné soustavy rovnic (v maticovém tvaru):

$$CT^* + K\bar{T} = \bar{Q} \quad (6.35)$$

kde značí: $\bar{T}$ - vektor neznámých teplot (oteplení potenciálů);
 $\bar{T}^{\bullet}$ - časovou derivaci vektoru teplot;
 C - matici tepelných kapacit;
 K - čtvercovou matici tepelných vodivostí(koeficientů soustavy);
 $\bar{Q}$ - vektor uzlových tepelných zatížení.

Schématický zápis řešení tepelných nestacionárních úloh, resp. rovnice (6.35) představuje soustavu lineárních diferenciálních rovnic prvního řádu. Pokud se vytvoří program na jejich řešení, pak je koncipován tak, že s ze zadání úlohy sestaví její rovnice – určí jednotlivé členy příslušných matic a vektoru $F^{\bullet}$ a následně je řeší.

Složitost řešení je spojená se samotným zadáním úlohy [při řešení ustáleného stavu, tj. kdy je $T^{\bullet} = 0$, řešení rovnice (6.35) představuje soustavu rovnic prvního řádu]. Též při použití konstantních tepelně-fyzikálních veličin (λ , c atd.) je řešení usnadněno. V případě, že je některá veličina závislá na teplotě, pak je řešení rovnice (6.35) složitější.

Při řešení nestacionárních úloh je nutná k řešení časová diskretizace – náhrada derivace vhodným diferenčním výrazem. V případě proměnných veličin závislých na teplotě T nebo na čase t probíhá výpočet iteračně po určitých časových krocích Δt . V případě veličin závislých jak na teplotě, tak i na čase, je pak nezbytná dvojí iterace.

Při vlastním výpočtu soubor vstupních dat představuje vlastní zadání úlohy. Pro řešení tepelných úloh jsou potřebné následující kroky:

- a) zadání výpočtové sítě (struktury) řešené oblasti, zahrnující souřadnice a popis uzlů a prvků;
- b) minimalizace šířky pásma matice koeficientů;
- c) zadání potenciálu v uzlech (okrajová podmínka 1. druhu);
- d) zadání podmínek okolí (okrajová podmínka 2. a 3. druhu);
- e) zadání zdrojů a norů ztrát tepla.

Z tepelně fyzikálních veličin je třeba u nestacionární úlohy zadat hodnoty tepelné vodivosti, hustoty a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě.

Vlastní výpočet lze pak uskutečňovat v programových jednotkách (modulech) na vysoce výkonných počítačích, nebo výpočetních stanicích.

Pro zpřesnění výpočtu je důležité zahrnutí vlivu tepelného přechodového odporu do tepelného výpočtu soustavy odlitek – kovová forma.

S tepelným přechodovým odporem – TPO (neboli kontaktním stykovým odporem), jehož vliv je popsán v kapitole 3.1, je nutno počítat v případech, kdy řešíme sdílení tepla mezi dvěma se stýkajícími tělesy nebo, kdy mezi tělesy vzniká mezera. Právě v případě nalití kovu do dutiny slévárenské formy vzniká těsný styk taveniny s lícem slévárenské formy. To má za důsledek, že za předpokladu nenulového tepelného toku se přes tyto povrchy ustaví teplotní spád. Takovýto spád vzniká právě v důsledku tepelného odporu proti tepelnému toku mezi korespondujícími povrchy těles (v tomto případě odlitek – forma).

Pro zpřesnění tepelných výpočtů mezi odlitkem a formou by bylo nejvýhodnější stanovit součinitel β v závislosti na teplotě pro konkrétní podmínky odlévání. Toto stanovení je však z fyzikálního hlediska zatím nemožné.

7. NÁVRH A SESTAVENÍ MĚŘÍCÍ APARATURY PRO MĚŘENÍ VZNIKU A PRŮBĚHU VZDUCHOVÉ VRSTVY MEZI ODLITKEM A KOVOVOU FORMOU

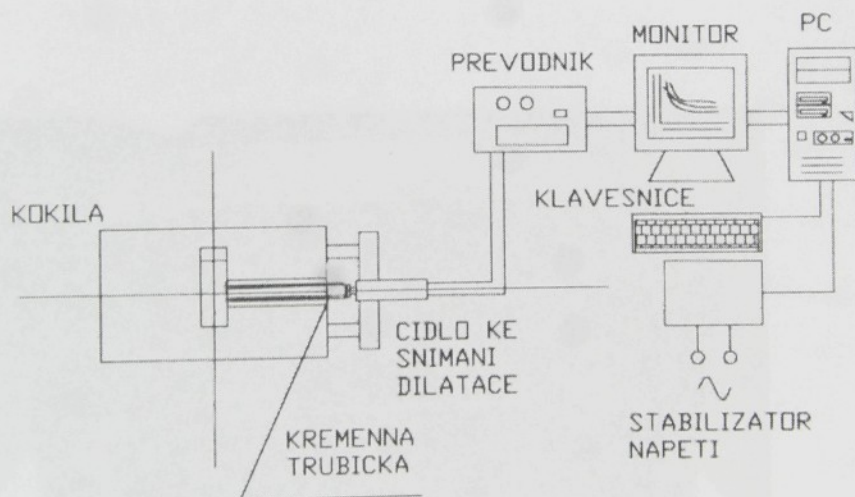
V rámci sledované problematiky bylo navrženo a sestaveno měřicí zařízení, které je schopno snímat časovou závislost vzniku, průběhu a rozměrové charakteristiky vzniklé plynové vrstvy mezi odlitkem a použitou slévárenskou formou. Při návrhu zařízení jsem vycházel z požadavku, že zařízení musí být zkonstruováno tak, aby zcela s dostatečnou přesností snímalo vznik vzduchové vrstvy a současně bylo z hlediska manipulace se slévárenskou formou (400 x 300 x 200 mm) dobře přemístitelné a nastavitelné do pracovní polohy i při ohřevu kokily na pracovní teplotu. Na základě teoretických zkušeností z mikroelektroniky jsem navrhnul pro snímání délkových změn odlitku a formy indukční snímač. Současně velkou problematikou bylo ustavení indukčního vysílače do polohy, která odpovídá měřenému místu. Po nejrůznějších konstrukcích jsem došel k té závěrečné, která se skládá z křemenných trubiček. Další problém ještě nastal s kalibrací indukčního snímače a vlastní zapojení nejrůznějších elektronických prvků nutných k převodu analogového signálu na digitální a registraci počítačem.

Jako druhá možnost se ukázalo využití registrační jednotky měřicího zařízení polské provenience a návrh jednoduchého rámu s využitím křemenných trubiček jako nosičů indukčního snímače.

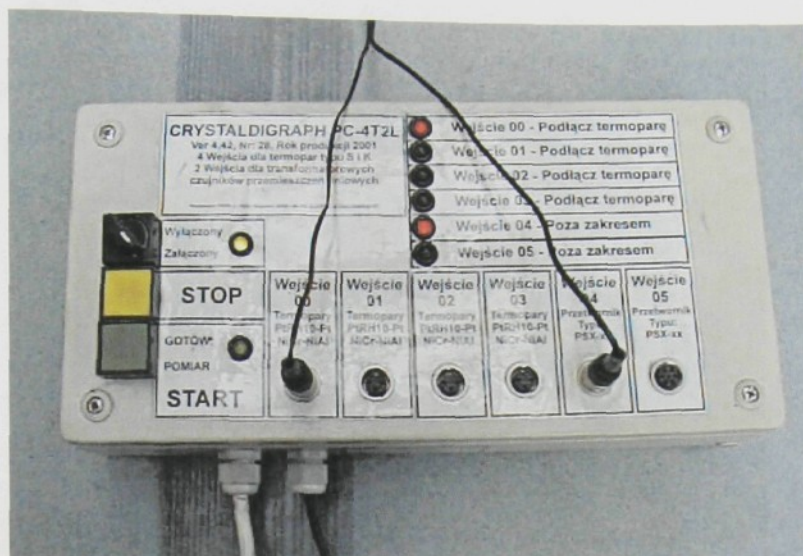
Na obr. 7.1 je blokové schéma použitého měřicího zařízení. Toto zařízení je tvořeno PC, převodníkem polské provenience, stabilizátorem napětí kokilou s měřícím čidlem upevněným na dvou křemenných trubičkách. Na obr. 7.2 je uveden převodník.

Dalším problémem bylo navržení spojovacího čidla mezi odlitkem a indukčním snímačem. Materiálem čidla byla jednoznačně určena křemenná trubička. Průchozí díra stěnou kovové formy má $\varnothing 5$ mm. Protože při zkoušení pohybu křemenné trubičky vlivem tuhnutí odlitku docházelo k její prasknutí v místě líce formy bylo provedeno opatření a do trubičky byl zabudován wolframový drát.

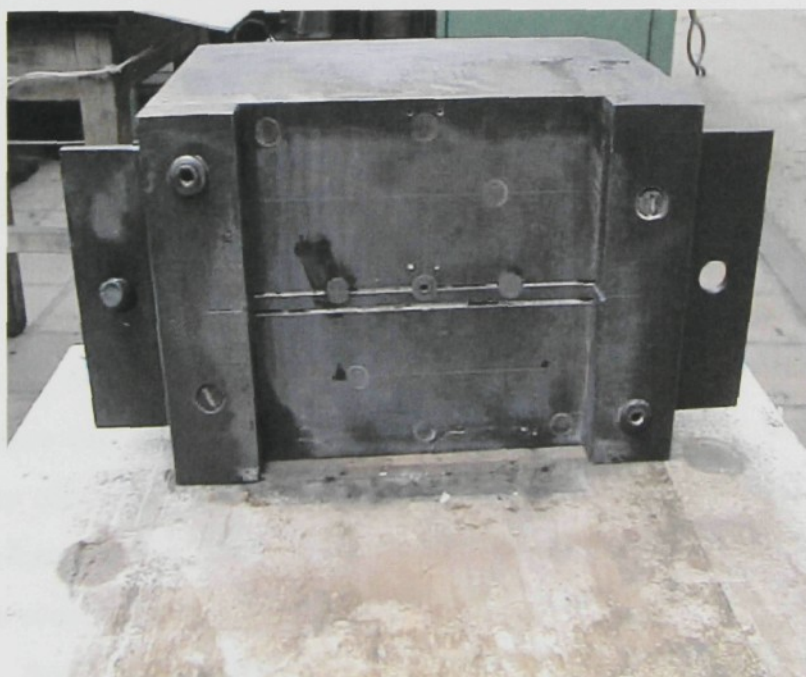
Na obr. 7.3 je uveden pohled na plochu líce jedné poloviny použité litinové kokily, ve které je díra pro vložení speciálně upravené křemenné trubičky $\varnothing 4 \times 210$ mm. Tato trubička tvoří element, který spojuje smršťování odlitku s měřícím čidlem.



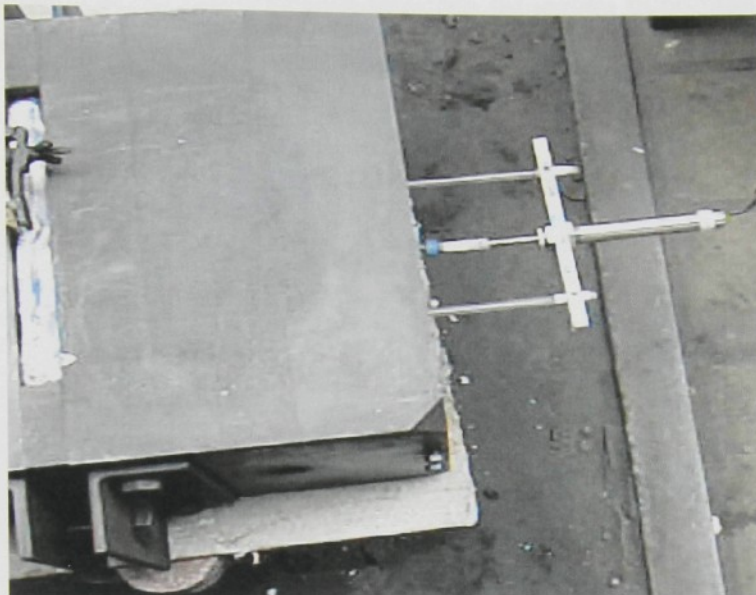
Obr. 7.1 Skupinové schéma měřicího zařízení



Obr. 7.2 Převodník polské provenience



Obr. 7.3 Pohled na polovinu litinové kokily s dírou uprostřed pro vložení křemenné trubičky



Obr. 7.4 Pohled na část kokily se zabudovaným měřícím čidlem pro smršťování odlitků

7.1 Popis provedených experimentů

V rámci měření teplotních polí mezi odlitkem a kokilou byla prováděna měření za účelem stanovení celkové tloušťky mezery mezi odlitkem a kokilou. K tomuto účelu byly vybrány a použity slévárenské materiály, které jsou uvedeny v kapitole 8 (čistý hliník, čistý zinek, AlSi13, AlSi10MgMn). Před každým experimentálním měřením byla odzkoušena správná funkce měřicího zařízení. Před odléváním byly taveniny těchto materiálů pečlivě metalurgicky ošetřeny rafinační solí T3 a po změření lící teploty byly odlity do připravené kokily. Účelem těchto měření bylo nejen zjištění časového vzniku a průběhu vzduchové vrstvy (ta je součástí mezery), ale především její tloušťky. S touto tloušťkou a tloušťkami nástríků (tj. tloušťkou mezery) bylo dále počítáno při zahrnutí přechodového odporu při následných simulačních výpočtech příslušných experimentů.

Pro měření časové závislosti vzniku vzduchové mezery byly použity slévárenské materiály, které byly současně použity k měření teplotních polí v litinové kokile, viz kapitola 8. Čistý hliník, $T_F = 200\text{ °C}$, bez nástríku líce formy; čistý hliník $T_F = 200\text{ °C}$, nástrík

0,3 mm; AlSi13 $T_F = 200\text{ }^\circ\text{C}$, bez nástřiku; AlSi13 $T_F = 200\text{ }^\circ\text{C}$, nástřik 0,3 mm; čistý zinek $T_F = 200\text{ }^\circ\text{C}$ bez nástřiku; čistý zinek $T_F = 200\text{ }^\circ\text{C}$ s nástřikem.

Vedle prováděných experimentů bylo pro informaci vypočítáno také smrštění odlitku a roztažnost kokily vlivem jejího ohřevu. Podle rovnice (3.10) a (3.13) byly vypočítány hodnoty smrštění odlitků při jejich tuhnutí a chladnutí a současně podle rovnice (3.11) hodnoty dilatace kokily pro příslušné experimenty. Teploty potřebné k výpočtu dilatací jsou uvedeny v příloze č. 8. Všechny vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7-1. Smrštění kokily při chladnutí bylo zanedbáno.

Tabulka 7 – 1 Přehled vypočítaných hodnot smrštění odlitku a kokily

	Podmínky experimentu	Dilatace rozměru Dutiny kokily [mm].*)	Tloušťka zákl. a funkč. nástřiku líce [mm]	Stažení odlitku [mm] ***)	Celkový rozměr mezery [mm]
1	Čistý hliník $T_F = 25\text{ °C}$	Zanedbána	bez	0,129 0,056	0,185
2	Čistý hliník $T_F = 220\text{ °C}$	0,024	bez	0,1344 0,0784	0,237
3	Čistý hliník $T_F = 220\text{ °C}$	0,024	0,35	0,1344 0,0784	0,587
4	AlSi13 $T_F = 18\text{ °C}$	Zanedbána	bez	0,1100 0,0550	0,165
5	AlSi13 $T_F = 230\text{ °C}$	0,025	bez	0,1120 0,0770	0,214
6	AlSi13 $T_F = 225\text{ °C}$	0,025	0,35	0,1120 0,0770	0,564
7	Čistý zinek $T_F = 25\text{ °C}$	Zanedbána	bez	0,1190 0,0580	0,177
8	Čistý zinek $T_F = 240\text{ °C}$	0,026	bez	0,1150 0,0720	0,213
9	Čistý zinek $T_F = 225\text{ °C}$	0,025	0,35	0,1150 0,0720	0,562
10	Čisté olovo $T_F = 18\text{ °C}$	Zanedbána	bez	0,0790 0,0430	0,122
11	Čisté olovo $T_F = 120\text{ °C}$	0,012	Bez	0,0820 0,0440	0,138
12	Čisté olovo $T_F = 120\text{ °C}$	0,012	0,35	0,0820 0,0440	0,488
13	AlSi10MgMn $T_F = 250\text{ °C}$	0,028	0,25	0,1144 0,0770	0,469
14	AlSi10MgMn $T_F = 190\text{ °C}$	0,021	0,45	0,1122 0,0770	0,660
15	AlSi10MgMn $T_F = 195\text{ °C}$	0,021	0,85	0,1122 0,0770	1,060
16	AlSi10MgMn $T_F = 190\text{ °C}$	0,021	1,25	0,1122 0,0770	1,460
17	AlSi10MgMn $T_F = 200\text{ °C}$	0,022	2,25	0,1122 0,0770	2,461

Poznámka *) Dilatace dutiny kokily je stanovena k vlivu jejího přehřevu.

**) Pod tímto pojmem rozumíme změnu rozměrů odlitku při tuhnutí

***) První číslo ve sloupci značí smrštění při tuhnutí; druhé smrštění při chladnutí

7.2 Hodnocení získaných výsledků

Z prováděných experimentů je zřejmé, že značný vliv na vznik mezery má tloušťka ochranného nátěru nebo nástřiku líce kokily. Bylo zjištěno, že s rostoucí tloušťkou nástřiku se zmenšuje tloušťka i rychlost růstu plynové vrstvy mezi odlitkem i kokilou, avšak tloušťka celkové mezery roste. To lze vysvětlit převažujícím zvětšováním tloušťky nástřiku. Zmenšování tloušťky a rychlosti růstu plynové vrstvy vlivem rostoucího nástřiku lze vysvětlit tím, že vzniká větší tepelná izolace a tím se zmenšuje intenzita přestupu, resp. prostupu tepla. To způsobuje snížení rychlosti tuhnutí odlévaného kovu. Současně výsledky experimentů ukázaly, že se vzduchová vrstva vytváří v okamžiku, kdy tuhnoucí tavenina vykazuje odvod tepla přehřátí, úplným ztuhnutím a chladnutím odlitku. VEJNÍK [66] to vysvětluje okamžikem krátce po vytvoření ztuhlé povrchové vrstvičky v odlitku.

8. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULAČNÍ VÝPOČTY TEPELNÝCH SLÉVÁRENSKÝCH DĚJŮ MEZI ODLITKEM A KOVOVOU FORMOU

Experimenty této práce byly zaměřeny na stanovení hodnot součinitele prostupu tepla mezi odlitkem a slévárenskou litinovou formou o rozměrech 400 x 300 x 200 mm určené pro výrobu odlitku tvaru desky 200 x 200 x 20 mm z vybraných slévárenských materiálů. Při volbě rozměrů formy byly respektovány i možné procesy, které by mohly daný děj ovlivnit. Také při volbě rozměrů odlitku tvaru desky bylo dbáno na to, aby se předešlo tepelnému ovlivňování jeho středu bočními plochami; tj volit tloušťku odlitku 6 až 10 krát menší než jeho délku a výšku. Dále byla použita ocelová kokila ČSN 19 552 o rozměrech 220x220x220 mm pro odlitek desky 220x160x20 [mm] do které byla odlévána technicky používaná slitina v automobilovém průmyslu AlSi10MgMn při gravitačním lití hlav spalovacích motorů.

Hlavním záměrem těchto prováděných experimentů bylo naměření časových závislostí teplot v odlitku a ve slévárenské formě při různých technologických podmínkách včetně ošetření líce ochranným nátěrem nebo nástřikem. Pro ošetření líce formy byly použity různé nátěry DYCOTE 5 (Foseco), které se používají k ošetřování líců kokil při odlévání neželezných kovů.

Též byl měřen vznik a průběh tvorby plynové vrstvy mezi odlitkem a formou, pomocí měřicí aparatury popsané v kapitole 7.

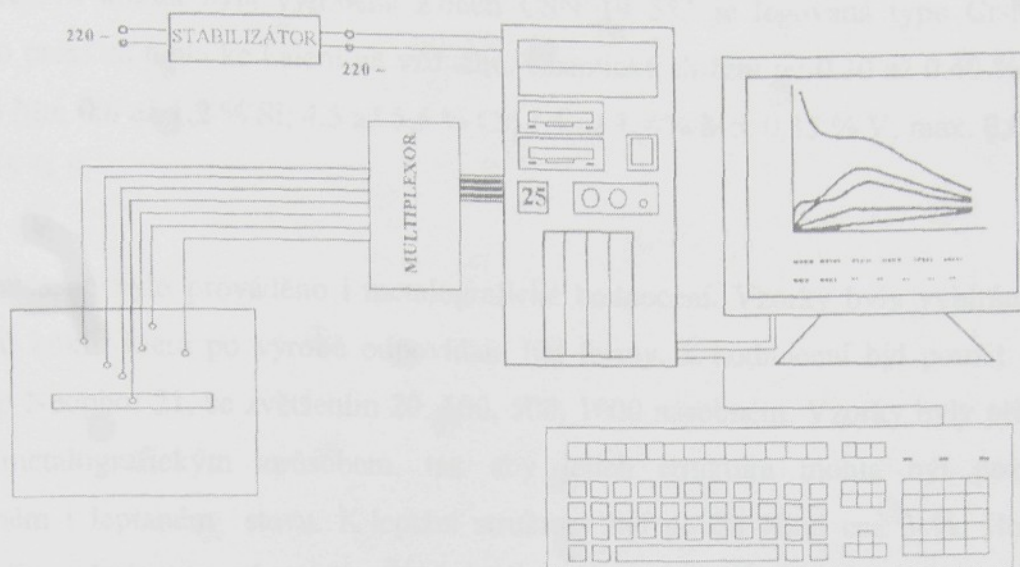
Všechna měření byla provedena na Katedře strojírenské technologie TU Liberec; zde byly vyhodnoceny i všechny dále uvedené experimenty.

8.1. Popis zařízení pro měření teplotních polí ve slévárenských formách

K měření časových závislostí teplot v odlitku a formě bylo použito měřicí zařízení sestavené na Katedře strojírenské technologie a průběžně inovované o nové mikroelektronické prvky. Skládá se z PC/AT Pentium s 16 čidlovým analogovým převodníkem PC LABDAS PCL 718 s multiplexorem PCLD 789. Daný převodník převádí přicházející analogový signál z termočlánků do digitálního tvaru a dále ho přivádí přes multiplexor k vyhodnocení do počítače vybaveného programem THERMAL, který byl vytvořen na naší katedře (KSP – TU Liberec). Do elektrického obvodu na napájecí straně počítače byl předřazen stabilizátor z důvodu stabilizace napětí proti výkyvům v elektrické síti, aby byla zajištěna správná funkčnost při snímání teplot. Skupinové schéma zařízení je na obr. 8.1.

Technické parametry karty PCLD – 718, multiplexeru PCLD 789:

- a) programové rozlišení 16 až 22 bitů;
- b) nelinearita typ. 0,0003 %;
- c) maximální chyba 0,005 % z údaje;
- d) propojením multiplexeru lze získat 126 měřených míst;
- e) zesílení signálu 100 násobné;
- f) rozlišení při měření teploty studeného konce 0,1 °C; přesnost 0,2 až 0,5 °C;
- g) teplotní drift typ. 20 ppm/K



Obr. 8.1 Skupinové schéma měřicího zařízení

Měřicí zařízení spolu se slévářenskou formou musí splňovat tyto požadavky:

- 1) velikost, tvar a dutina formy musí v určité míře zajišťovat nezkreslené podmínky experimentů;
- 2) termoelektrické články, které jsou použity k měření teploty ve slévářenské formě musí být situovány tak, aby potlačily škodlivý vliv odvodu tepla z měřeného místa, nejen svým uložením, ale také vhodnou volbou menšího průřezů termočlánekových vodičů, tak aby byla spolehlivě sledována skutečná teplota;
- 3) měřicí zařízení musí zajistit co nejjednodušší, dostatečně přesný a přehledný způsob zápisu a jednoduché interpretace naměřených hodnot. Na obr. 8.2 je uvedeno schéma hlavních rozměrů litinové kokily, na obr. 8.3 kokily ocelové. Na obr. 8.4 a 8.5 je pohled na připravené kokily k odlévání.

8.2. Charakteristika materiálů kovových slévářenských forem

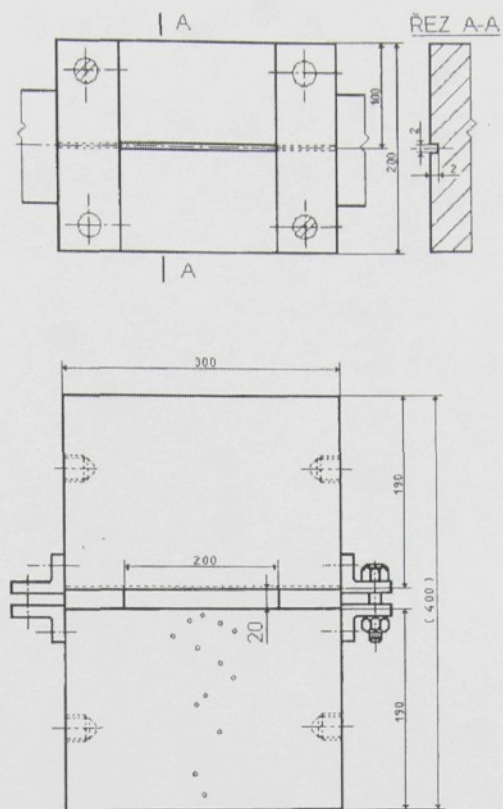
Kovová forma byla vyrobena z litiny ČSN 422420 (EN-GJL-220U) s rozměry 400 x 300 x 200 mm. Chemické složení bylo zjištěno analyzátozem LECO (výrobce USA) je: 3,40 % C; 0,88 % Mn; 1,95 % Si; 0,149 % P; 0,091 % S ($C_E = 3,95$). Materiál kovové formy byl vyroben ve Slévárně Liberec, tavením v horkovětrnné kuplovně s následným použitím mísiče PIKS 20, k očkovaní byl použit FeSi75 – Gramod v poměru 2:1.

Ocelová kokila byla vyrobená z oceli ČSN 19 552 je legovaná typu Cr-Mo-Si-V určená pro práci za tepla ke kalení na vzduchu. Chemické složení 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.

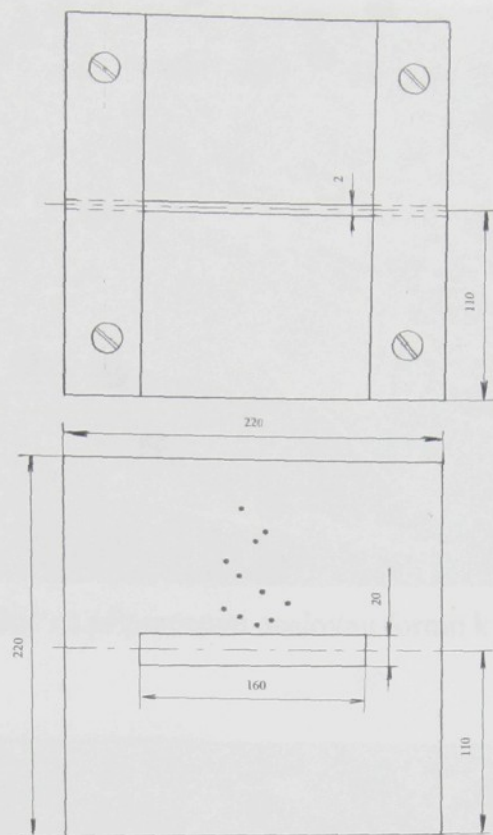
Současně bylo prováděno i metalografické hodnocení. Vzorky byly vybírány z míst polotovarů kokil, která po výrobě odpovídala líci formy. K hodnocení byl použit světelný mikroskop Neophot 21, se zvětšením 20, 100, 500, 1000 násobným. Vzorky byly připraveny běžným metalografickým způsobem, tak aby jejich struktura mohla být pozorována v neleptaném i leptaném stavu. K leptání struktury byl použit Nital cca 3 %. Hodnocení struktury litiny bylo provedeno dle ČSN 42 0461, byl sledován tvar, velikost a rozložení grafitu i přítomnost dalších strukturních fází a součástí.

Hodnocení grafitu bylo provedeno podle etalonové řady ČSN. Grafit je lupínkový rovnoměrný, velikost lupínků od 60 do 250 μm , to odpovídá značení IA 4 až 5. Matrice litiny je feriticko-perlitická, Fe70, obsah feritu je od 60 do 80 % (obsah perlitu od 20 do 40 %). Perlit je lamelární, to odpovídá značení P1; disperzivita 1,4 (tj. od 1,3 do 1,6 μm). Obsah eutektického cementitu je od 0 do 2 %, tj. C2. Velikost útvarů eutektika je do 2000 μm^2 , to odpovídá značení Cv 2000. Fosfidické eutektikum je ternární, jemnozrnné - značení F2. Velikost síťoví Fd 250 (tj. do 250 μm). Velikost útvarů eutektika Fv 2000, plocha je do 2000 μm^2 . Litina s lupínkovým grafitem má dle ČSN 42 0461 označení: IA4 – 5 – P1 – F70 – Pd 1,4 – F2 – Fr 3 – Fv 2000.

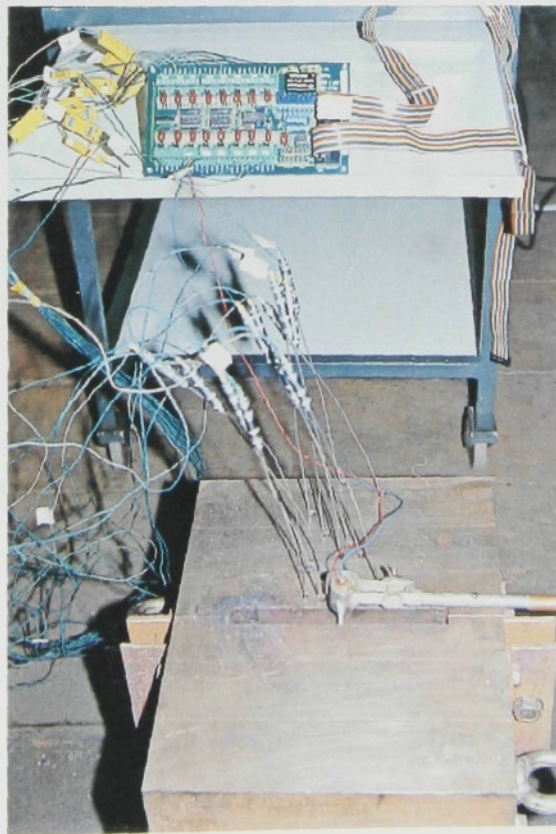
Na obr. 8.6 a 8.7 je uvedena struktura litiny v neleptaném a leptaném stavu.



Obr. 8.2 Schéma litinové kokily s vyznačením hlavních rozměrů



Obr. 8.3 Schéma ocelové kokily s vyznačením hlavních rozměrů



Obr. 8.4 Pohled na připravenou litinovou formu k odlévání (v pozadí multiplexor)



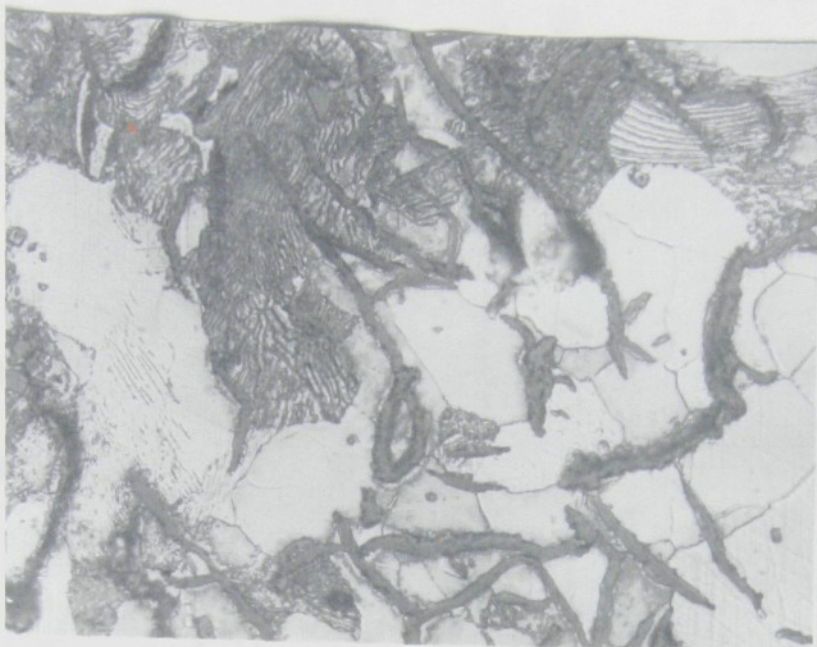
Obr. 8.5 Pohled na připravenou ocelovou formu k odlévání



Neleptáno

100 x

Obr. 8. 6 Tvar, velikost a rozložení grafitu ve struktuře litinové kokily (ČSN422420)



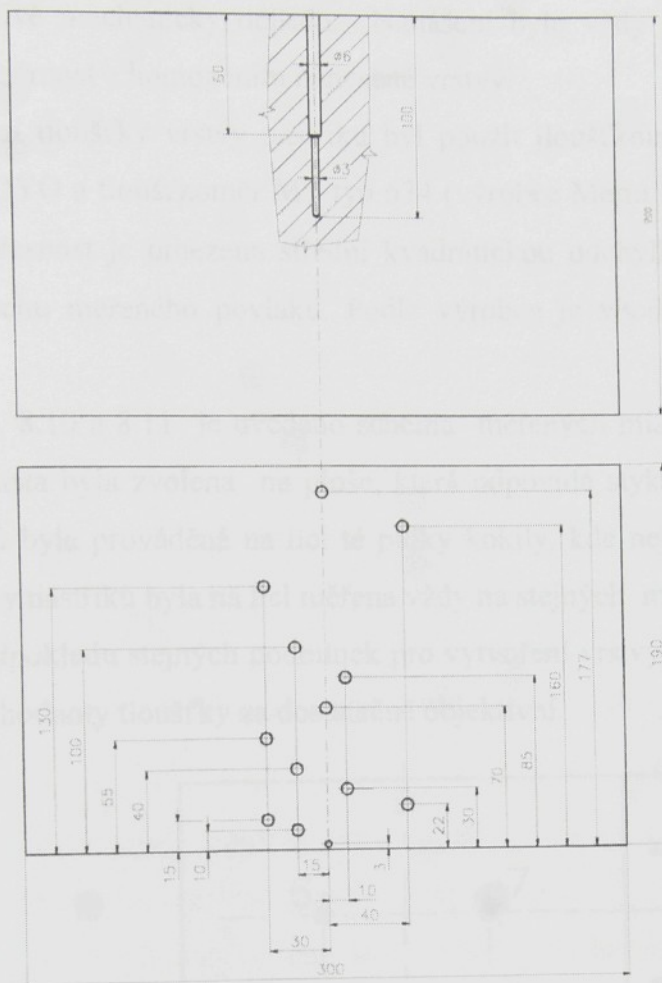
Nital

500 x

Obr. 8. 7 Perliticko-feritická struktura litiny s lupínkovým grafitem

8.3. Měření teploty

Pro měření teploty ve sledovaných místech kovové formy byly použity speciální plášťované termočlánky švýcarské provenience Fy LEMO typu NiCr – Ni, podle mezinárodního značení typ K. Pracovní čidlo je $\varnothing 2 \times 300$ mm a je přizpůsobeno k manipulaci v hlubokých otvorech. Teplota v tepelné ose odlitku byla sledována též termočlánkem NiCr – Ni, $\varnothing$ vodičů 0,2 mm, který byl speciálně připravený pro každý experiment zvlášť. Pracovní čidlo termočlánku bylo opatřeno korundovou dvoukapilárou LUXAL (výrobce Elektroporcelán Louny). Na obr. 8.8 a 8.9 jsou uvedeny schémata obou kokily s vyznačením otvorů pro zavedení termočlánků. Použité termočlánky jsou typu K (NiCr-NiAl) a vykazují lineární změnu napětí na teplotě, shodně s termočlánky chromel-alumel. Kalibrační křivka termočlánku je uvedena v příloze č. 7, spolu s tabulkou, kde je přehled mezinárodního značení.



Obr. 8.9 Schéma litinové kokily s vyznačení otvorů pro zavedení termočlánků

8.4. Stanovení a vyhodnocení tloušťky použitého nástřiku DYCOTE 5

Jednotlivé experimenty byly prováděny za podmínek odlévání do kokily bez nástřiku líce formy nebo za podmínek odlévání do formy, jejíž líc byl opatřen vrstvou ochranného nástřiku DYCOTE 5 o tloušťce 0,3 mm. Pod tímto nástřikem byla vrstva 0,05 mm základního nástřiku od firmy Foseco (bližší informace výrobce neuvádí). Vrstva základního nástřiku se nanášela na přehřátou kokilu o teplotě 150 °C. Nástřik DYCOTE 5 byl požadované tekutosti pro stříkání a též nanášen na přehřátou kokilu o teplotě 150 °C. Voda v nástřiku působí jako plastifikátor a v důsledku dehydratace se z nástřiku stává tuhá ochranná vrstva líce formy.

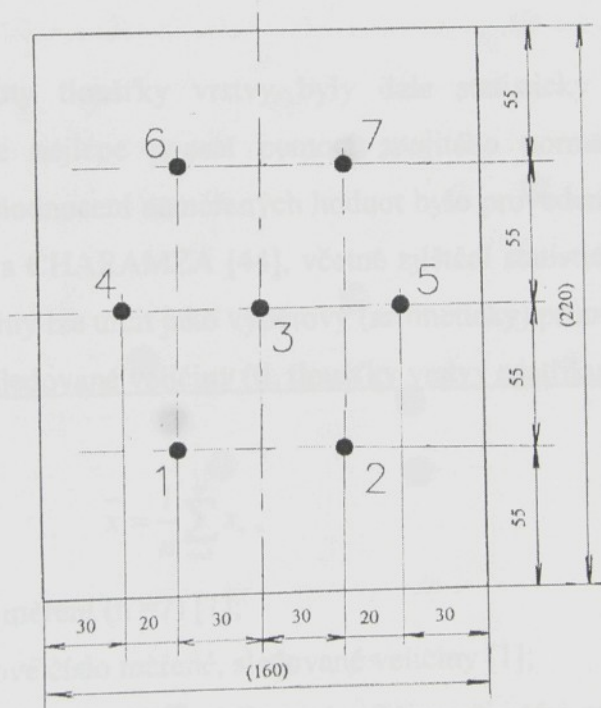
Všechny použité ochranné materiály byly naneseny pomocí tlakového vzduchu (s použitím stříkací pistole), tj. byly provedeny v podobě nástřiku. Před nanesením vrstev byl

líc kokily pečlivě mechanicky očištěn. Nanášení bylo vždy prováděno se snahou o co největší rovnoměrnost a homogenitu nanesené vrstvy.

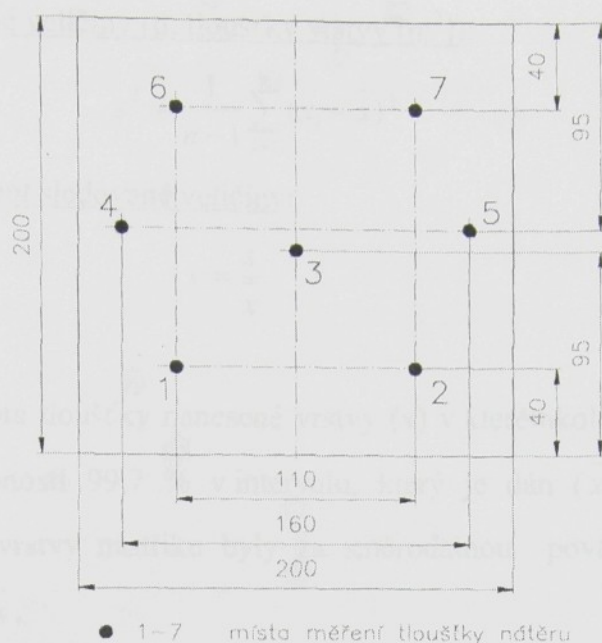
K měření tloušťky vrstvy nástřiku byl použit tloušťkoměr japonské proveniencie od firmy MITUTOYO a tloušťkoměr MT typ 634 (výrobce Metra Praha), jehož rozsah je od 10 do 500 μm . Přesnost je omezena střední kvadratickou odchylkou $\pm 10 \%$, která závisí na hladkosti povrchu měřeného povlaku. Podle výrobce je vhodné provádět měření na více místech.

Na obr. 8.10 a 8.11 je uvedeno schéma měřených míst ochranného nástřiku na lici kokily. Tato místa byla zvolena na ploše, která odpovídá styku odlitku s formou. Tloušťka vrstvy nástřiků byla prováděná na lici té půlky kokily, kde nejsou otvory pro termočlánky. Tloušťka vrstvy nástřiků byla na lici měřena vždy na stejných místech, kterých bylo 7.

Za předpokladu stejných podmínek pro vytvoření vrstvy na všech místech líce formy, lze považovat hodnoty tloušťky za dostatečně objektivní.



Obr. 8.10 Schéma měřených míst tloušťky nátěru na lici litinové formy



Obr. 8. 11 Schéma měřených míst tloušťky nátěru na lici ocelové formy

Naměřené hodnoty tloušťky vrstvy byly dále statisticky vyhodnoceny. Soubor naměřených hodnot lze nejlépe popsat pomocí spojitého normálního (tzv. Gaussova) rozdělení. Statistické vyhodnocení naměřených hodnot bylo provedeno na základě literárního podkladu HANOUSEK a CHARAMZA [44], včetně zjištění statistických ukazatelů. Střední hodnotu sledované veličiny lze určit jako výběrový (aritmetický) průměr naměřených hodnot:

- a) střední hodnotu sledované veličiny (tj. tloušťky vrstvy nástřiku v [m]):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (8.1)$$

kde značí: n – počet měření ($n=7$) [1];

i – pořadové číslo měření, sledované veličiny [1];

x_i – naměřenou hodnotu sledované veličiny při i -tém měření [m].

- b) směrodatnou odchylku sledované veličiny (tj. tloušťky vrstvy [m]):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (8.2)$$

c) rozptyl sledované veličiny (tj. tloušťky vrstvy [m²]):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{8.3}$$

d) variační koeficient sledované veličiny:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \tag{8.4}$$

Skutečná hodnota tloušťky nanesené vrstvy (x) v kterémkoliv místě formy se potom nachází s pravděpodobností 99,7 % v intervalu, který je dán $(\bar{x} - 3s, \bar{x} + 3s)$ Při dalším uvažování tloušťky vrstvy nástřiku byly za směrodatnou považována střední hodnota tloušťky vrstvy tj. $x \approx \bar{x}$.

8.5. Použité slévárenské slitiny a jejich příprava pro experimenty

Z ryze experimentálních důvodů byly použity kovy, které jsou uvedeny v tabulce 8 - 1 a tuhnou při jedné teplotě (s výjimkou AlSi10MgMn).

Tabulka 8 - 1 Přehled použitých slévárenských materiálů

Odlévaný kov	Teplota tání [°C]
Čistý hliník	660
Čistý zinek	419
Čisté olovo	327
Slitina AlSi13	577*
	560**
Slitina AlSi10 MgMn	601 (T _L)
	575 (T _S)

Poznámka: * bez modifikace,

** po modifikaci

Tavenina odlévaných kovů byla tavena v grafitovém kelímku v odporové peci (výrobce BEZ Bratislava). Před každým odléváním byla tavenina příslušných kovů metalurgicky ošetřena, zbavena vměstků, u slitiny hliníku - AlSi13 ošetřena modifikační solí T3 (tj. směs solí NaF, NaC₂, KC₂, SiO₂ – teplota tání 750 °C). Současně bylo provedeno

měření teploty taveniny těsně před jejím odlitím pomocí digitálního teploměru MIKROTERM (výrobce Závody měřicí a regulační techniky Polička), aby byly zajištěny pokud možno stejné podmínky experimentů.

8.6. Popis experimentů při sledování časových závislostí teplot v odlitku a kokile

V této části práce jsou popsána experimentální měření sledování časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku a v určitých vzdálenostech od líce formy, jak je patrné z obr. 6.6. definovaných podmínek. Měření časových závislostí bylo provedeno za pomoci měřicího zařízení, které je popsáno v kapitole 8.1 a termočlánků, jež jsou popsány v kapitole 8.3. V případě ošetření líce slévárenské formy ochranným nástřikem byla na formě o teplotě (cca 20 °C) změřena tloušťka použitého nástřiku, viz kapitola 8.4. V tabulce 8-2 jsou uvedeny podmínky vybraných experimentů. V této souvislosti je nutno uvést, že bylo provedeno velké množství experimentů a pro účely této práce byly vybrány jen ty nejdůležitější. V tabulce 8 - 3 jsou uvedeny naměřené hodnoty tloušťek ochranného nástřiku. V příloze č. 9 jsou uvedeny hodnoty vybraných veličin použitých slévárenských slitin. V tabulce 8 – 4 jsou uvedeny hodnoty nátěrů DYCOTE 5 na ocelové kokile do které byla odlévána perspektivní slitina AlSi10MgMn.

Naměřené časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a ve stěně kokily jsou uvedeny spolu s příslušnými simulačními výpočty v následující části kapitoly 8.

Současně byla provedena měření časového průběhu vzniku mezery mezi příslušným odlitkem a ohrátkou, na líci ošetřenou kokilou (nástřikem). K tomuto měření bylo použito zařízení popsané v kapitole 7, které bylo před každým experimentem pečlivě seřízeno a odzkoušeno. Zjištěné závislosti jednotlivých experimentů označených (č.1 až č. 19) a (č.I až VII) jsou uvedeny v této kapitole spolu s podmínkami příslušného simulačního výpočtu.

Tabulka 8-2 Přehled prováděných experimentů

Číslo měření	Odléváný kov	Nátěr líce formy	Teplota formy [°C]	Teplota lití [°C]	Doba tuhnutí [s]
1	Čistý hliník	bez nástřiku	25	720	14
2	Čistý hliník	bez nástřiku	200	720	16
3	Čistý hliník	s nástřikem	220	735	21
4	Čistý hliník	s nástřikem	235	745	24

5	AlSi 13	bez nástřiku	18	670	33
6	AlSi 13	bez nástřiku	230	655	34
7	AlSi 13	bez nástřiku	240	680	43
8	AlSi 13	s nástřikem	225	695	50
9	AlSi 13	s nástřikem	240	645	54
10	Čistý zinek	bez nástřiku	25	445	27
11	Čistý zinek	bez nástřiku	240	435	39
12	Čistý zinek	s nástřikem	215	440	53
13	Čistý zinek	s nástřikem	225	450	59
14	Čisté olovo	bez nástřiku	18	350	8
15	Čisté olovo	bez nástřiku	120	335	17
16	Čisté olovo	s nástřikem	115	345	21
17	Čisté olovo	s nástřikem	120	340	22

Poznámka: K nástřiku líce kokily byl použit DYCOTE 5. Základní nástřik na očištěný líc kokily byl použit od výrobce fy: FOSECO o tloušťce 0,05 mm. Na tento nástřik byla nastříkána vrstva DYCOTE 5, výsledná tloušťka nanesených vrstev byla cca 0,3 mm. Základní nástřik je vodivý.

Tabulka 8 – 3 Přehled tlouštěk nátěrů v jednotlivých místech litinové kokily pro uvedená měření

Číslo měření	Odléváný kov	Tloušťka vrstvy nástřiku líce formy [μm] v jednotlivých místech líce litinové kokily (x _i)							$\overline{X}$ [μm]	s [μm]	v [l]
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇			
3	Čistý hliník T _F = 220 °C	310	301	305	315	311	305	305	307,43	4,7559	0,01547
4	Čistý hliník T _F = 235 °C	304	314	320	310	322	310	302	311,71	7,5214	0,02413
8	AlSi 13 T _F = 225 °C	309	310	305	320	315	306	310	310,72	5,2190	0,01680
9	AlSi 13 T _F = 240 °C	310	308	315	319	310	300	321	311,86	5,2630	0,01688
12	Čistý zinek T _F = 215 °C	314	301	305	315	310	311	300	308,00	6,0277	0,01939
13	Čistý zinek T _F = 225 °C	310	315	300	305	317	309	310	309,43	5,7400	0,01855
16	Čisté olovo T _F = 115 °C	306	316	300	308	310	315	305	308,57	5,6526	0,018318
17	Čisté olovo T _F = 120 °C	304	311	315	320	314	319	321	314,86	5,1643	0,016401

Tabulka 8 – 4 Přehled jednotlivých experimentů s různou tloušťkou DYCOTE 5 a odlévané slitiny AlSi10MgMn

Označení měření	Ošetření líce formy nátěrem [mm]	Počáteční teplota formy T_F [°C]	Naměřená teplota lité [°C]	Čas tuhnutí odlitku [s]
I	0,2 mm DYCOTE 5	250	800	68
II	0,4 mm DYCOTE 5	210	720	73
III	0,8 mm DYCOTE 5	195	710	120
IV	1,2 mm DYCOTE 5	190	730	150
V	2,2 mm DYCOTE 5	200	700	225
VI	0,2 mm ZN - FOSECO	235	735	54
VII	0,4 mm ZN - FOSECO	230	720	68

Poznámka: Pod vrstvou nástřiku DYCOTE 5 byla aplikovaná vrstva základního nátěru o tloušťce 0,05mm. Základní nástřik je vodivý.

Tabulka 8 – 5 Přehled naměřených tlouštěk jednotlivých nástřiků na líci ocelové kokily ČSN 19 552

Označení měření	Tloušťka vrstvy nástřiku líce formy [μm] v jednotlivých místech líce ocelové kokily (x_i)							$\bar{x}$ [μm]	s [μm]	v [1]
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7			
I	205	206	209	210	215	219	210	210,57	4,928	0,0234
II	411	415	421	406	408	416	411	411,29	3,546	0,0086
III	811	808	818	814	816	821	805	813,29	5,648	0,0007
IV	1216	1210	1221	1215	1208	1219	1210	1214,14	4,947	0,0040
V	2209	2211	2219	2216	2220	2215	2211	2214,43	4,769	0,0019
VI	203	209	211	215	217	214	209	211,14	4,769	0,0226
VII	406	415	409	408	412	415	410	410,71	3,450	0,0084

8.7. Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků v kovových formách

Pro simulační výpočty tuhnutí odlitků z vybraných neželezných materiálů v litinové kokile byl použit program SIMTEC německé provenience (fa. RWP Aachen). Součástí programu je databanka tepelně-fyzikálních veličin, kterou lze doplňovat vlastními daty. Program vychází ze základních rovnic přenosu tepla. Simulační výpočet je prováděn ve třech základních krocích:

Preprocessing - načítá geometrická data odlitku buď z externího CAD programu (kde jsou uloženy již vytvořené výkresy odlitků), nebo je geometrie vytvořena pomocí vlastního CAD systému Euklid (Automatic Mesh Generator), ve kterém uživatel navíc připojuje k odlitku vhodnou vtokovou soustavu.

Mainprocessing - provádí hlavní část celého simulačního programu, kdy vypočte změny teplot během simulovaného slévárenského procesu, případně provede napěťové analýzy odlitků. Na začátku je nejprve provedeno načtení geometrických dat odlitku a z databáze programu tepelně-fyzikálních veličin použitých materiálů odlitku a formy. Dále jsou uživatelem zadávány další podmínky jako je např. lící teplota taveniny, počáteční teplota formy, teplota okolí, latentní teplo použitého materiálu, rychlost plnění formy a velikost časového intervalu a výpočtového kroku. Nejnovější verze programu navíc řeší i velmi složitou problematiku plnění formy, které je ovlivňováno řadou fyzikálních faktorů taveniny, jako je viskozita, povrchové napětí, turbulence atd.

Postprocessing - je modul pro zobrazení a vyhodnocení výsledků simulačního výpočtu. Výsledky se zobrazují pro lepší orientaci barevně ve 2D či ve 3D. Zobrazit lze:

- a) izotermy a křivky minimálních a maximálních teplot
- b) zbytková napětí odlitku a deformace
- c) kritériální funkce (teplotní gradient, rychlost tuhnutí a jejich kombinace)
- d) určení struktury odlitku.

Pro simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků v kovových formách je důležitý vliv součinitele přestupu tepla (inversní hodnota tepelného odporu), který popisuje děje na rozmezí odlitek – forma. Časová závislost tohoto součinitele byla stanovena na základě zpětného simulačního výpočtu. Tuto metodu poprvé použil STOLZ, jak uvádí [46] a je označována IHCP (Inverse heat conduction problem). Z naměřených průběhů teplot uvnitř tělesa v tomto případě odlitku a formy se stanovuje součinitel prostupu nebo přestupu tepla.

8.7.1. Přehled tepelně fyzikálních veličin potřebných pro simulační výpočet

Pro simulační výpočty byly použity tyto tepelně-fyzikální veličiny pro litinovou kokilu ČSN 42 24 20, viz tabulka 8 - 6.

Tabulka 8 – 6 Hodnoty veličin použité litiny s lupínkovým grafitem (ČSN 42 2420)

Teplota [°C]	Hustota [kg.m⁻³]	Měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹]	Tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]	Objemová tepelná kapacita [J.m⁻³.K⁻¹]
20	7250	640	51,2	4 640000
100	7233	675	48,2	4 903974
200	7208	729	44,8	5 254632
300	7179	779	42,2	5 592441
400	7149	828	39,8	5 92441
500	7118	909	38,1	5 926521
600	7086	1135	36,1	6 470262
700	7053	1386	35,9	9 775458

Další potřebné veličiny pro simulační výpočet jsou uvedeny zvlášť u každého měření. Měření jsou seřazena, tak jak jsou uvedena v tabulkách 8 – 2 a 8 – 4.

V následující části práce jsou uvedeny tabelární přehledy hodnot, které byly potřebné pro simulační výpočty, tak aby se provedené výpočty co nejvíce shodovaly s prováděnými experimenty.

Pro zpřesnění simulačních výpočtů byly využity naměřené hodnoty dilatačních vlastností odlitků při určení časové závislosti tloušťky a vzniku plynové vrstvy. Pro simulační výpočet byla pak uvažována fiktivní vrstva vzduchu o naměřené hodnotě zjištěné experimentálním měřením, viz kapitola 7. U experimentů s použitým nástřikem byla ještě pro simulační výpočet uvažována fiktivní vrstva příslušného nástřiku. Na základě simulačního výpočtu byly stanoveny teplotní závislosti součinitele prostupu tepla β , který je uveden vždy u příslušného experimentu a také v následných komplexních přehledových tabulkách a grafech. Z těchto tabulek byla následně použita data a vytvořeny grafy pro porovnání vlivu různých technologických podmínek na hodnotu součinitele prostupu tepla β pro jednotlivé

materiály (obr. 8.12. - 8.16.) a také provedeno porovnání jeho hodnoty pro různé materiály za podobných technologických podmínek (obr. 8.17. – 8.19.).

Vzdálenosti termočlánků od líce formy

- 1 – tepelná osa odlitku;
- 2 – líc slévárenské formy;
- 3 – 3 [mm] od líce formy;
- 4 – 10 [mm] od líce formy;
- 5 – 15 [mm] od líce formy;
- 6 – 22 [mm] od líce formy;
- 7 – 30 [mm] od líce formy;
- 8 – 40 [mm] od líce formy;
- 9 – 55 [mm] od líce formy;
- 10 – 70 [mm] od líce formy;
- 11 – 85 [mm] od líce formy.

HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 1

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čistý hliník
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	600
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	396 100
Teplota kokily [°C]	25
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	20
Teplota dna formy [°C]	20
Izolační materiál dna formy	sibral

Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

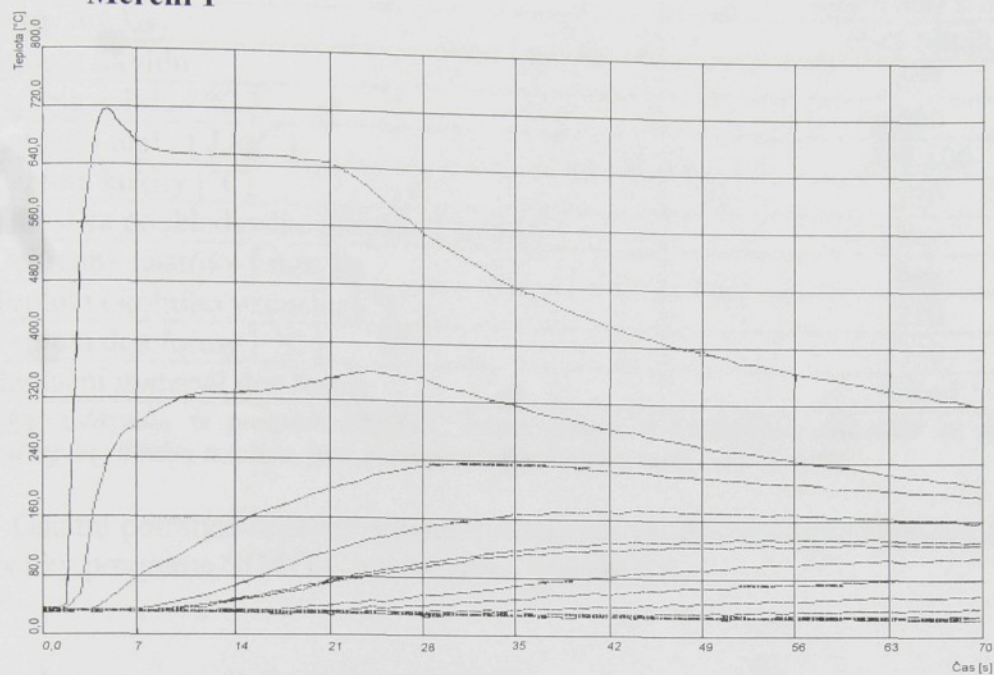
Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

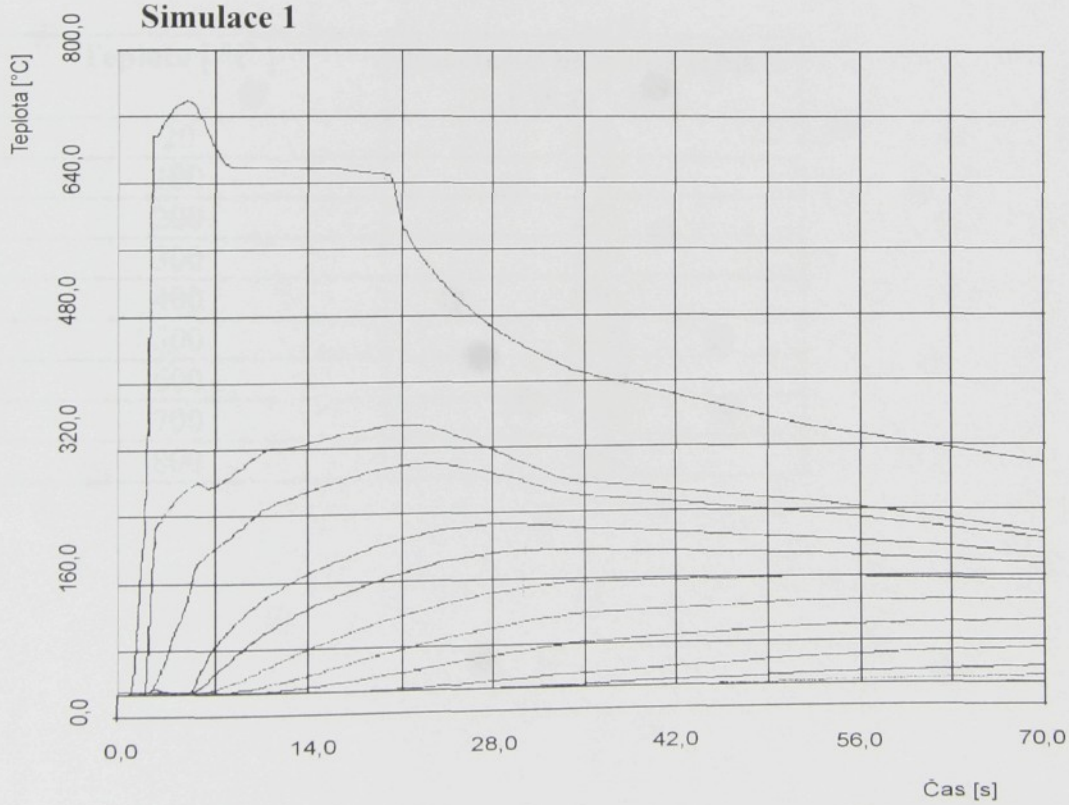
Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	100
100	200
200	450
300	650
400	950
500	2000
600	3100
700	4000
800	4000

Porovnání měření a simulace

Měření 1



Simulace 1



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 2

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odlévavý kov	čistý hliník
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	600
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	396 100
Teplota kokily [°C]	220
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	210
Teplota dna formy [°C]	210
Izolační materiál dna formy	Sibral

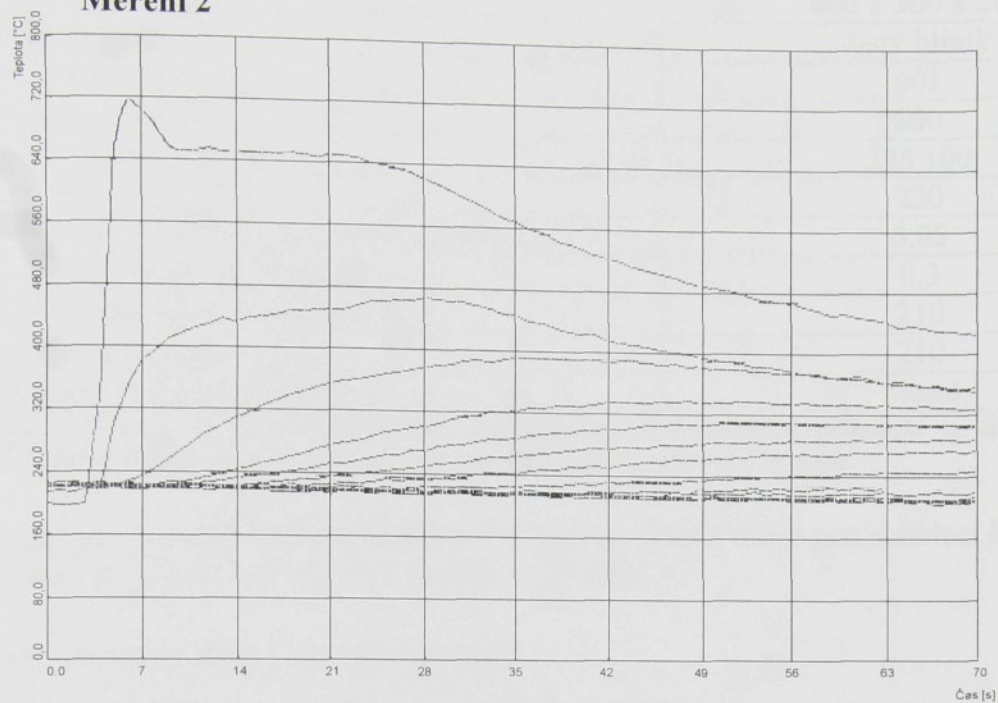
***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévaných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č. 9.

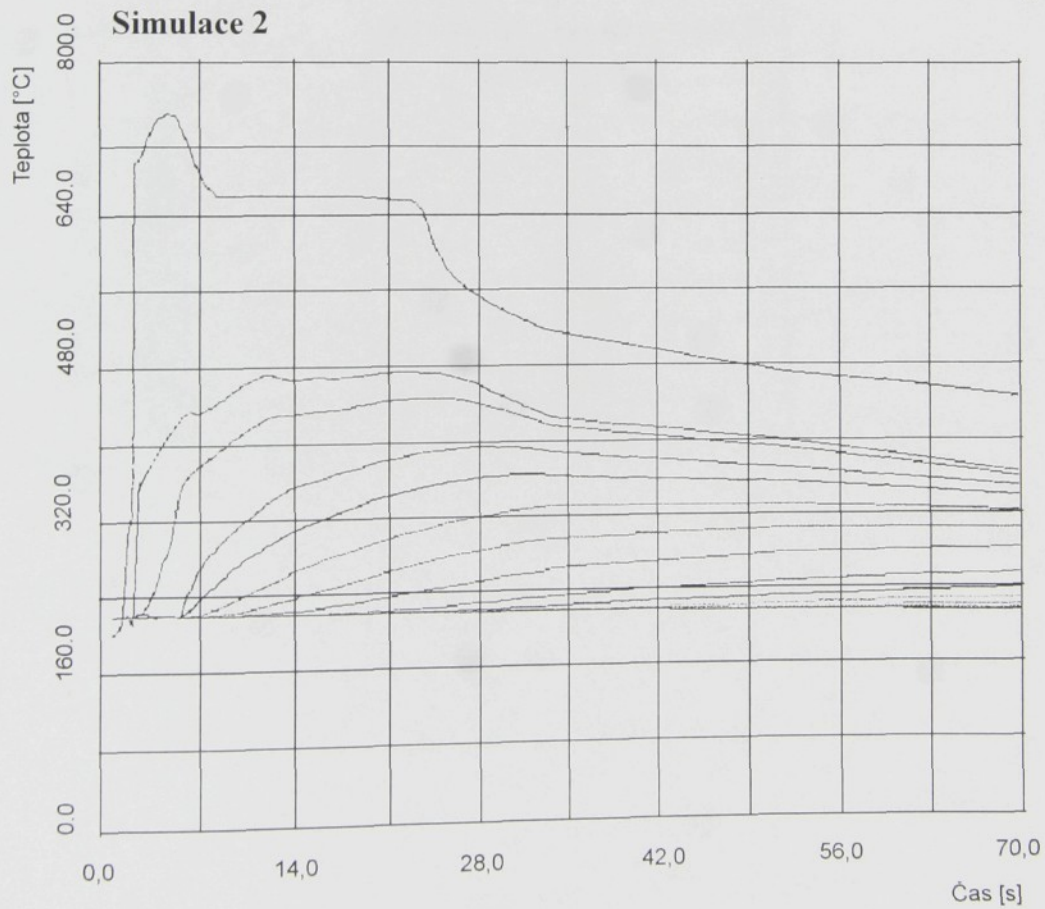
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	100
100	150
200	250
300	400
400	800
500	1700
600	2500
700	3600
800	3600

Měření 2



Simulace 2



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 3

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odlévaný kov	čistý hliník
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	600
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	396 100
Teplota kokily [°C]	220
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	210
Teplota dna formy [°C]	210
Izolační materiál dna formy	Síbral

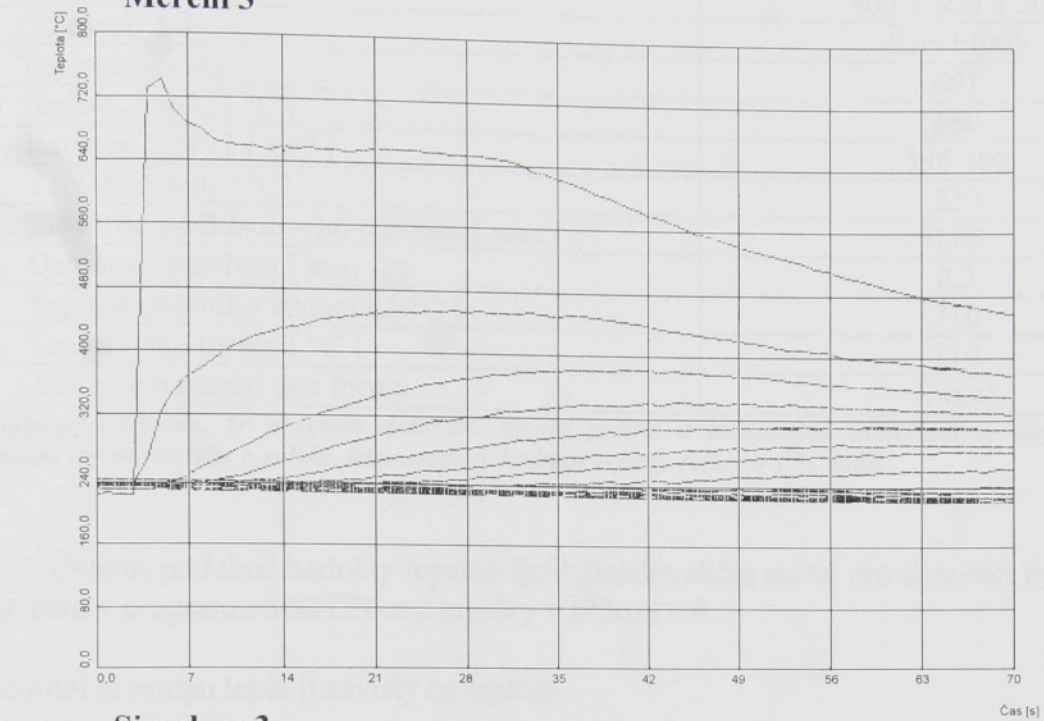
***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévaných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č.9.

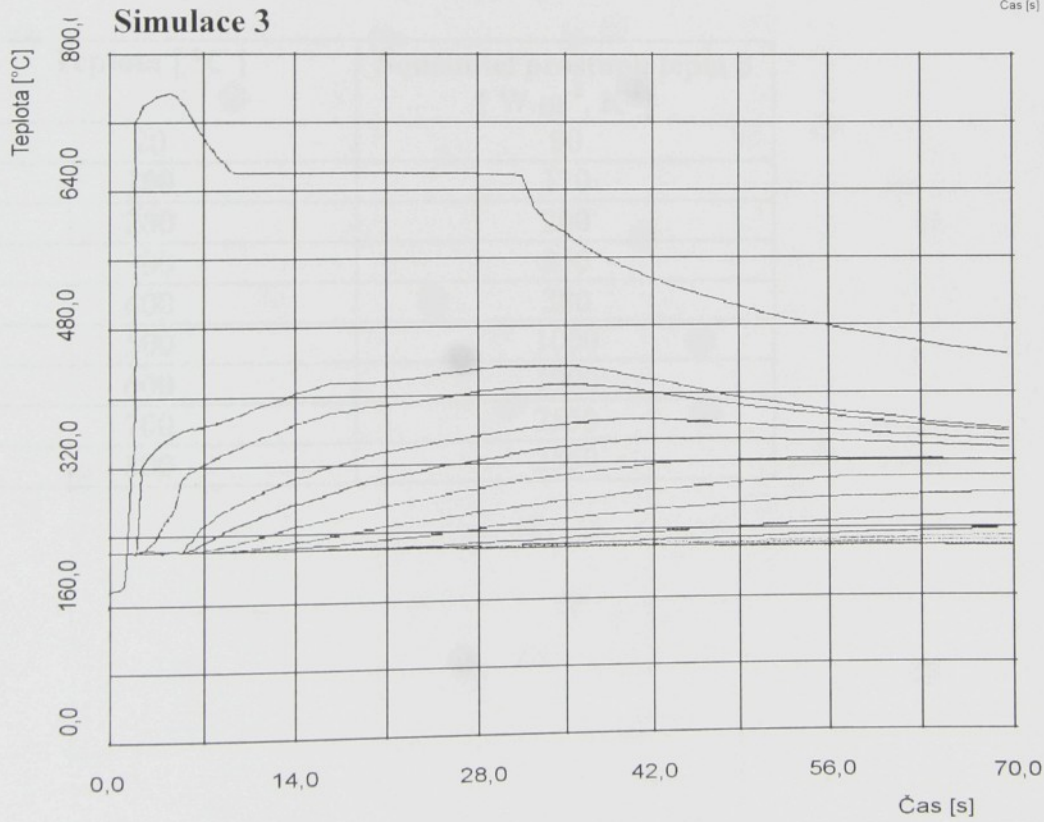
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m⁻². K⁻¹]
20	90
100	120
200	200
300	300
400	420
500	1100
600	2200
700	2700
800	2700

Měření 3



Simulace 3



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 4

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čistý hliník
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	660
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	396 100
Teplota kokily [°C]	220
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	210
Teplota dna formy [°C]	210
Izolační materiál dna formy	Sibral

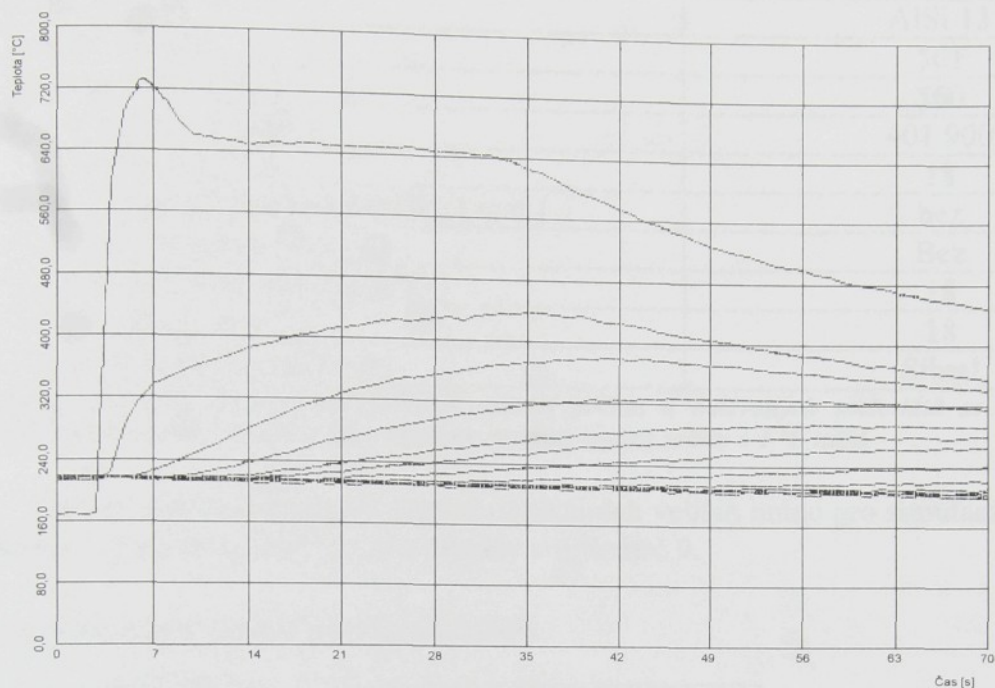
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č.9.

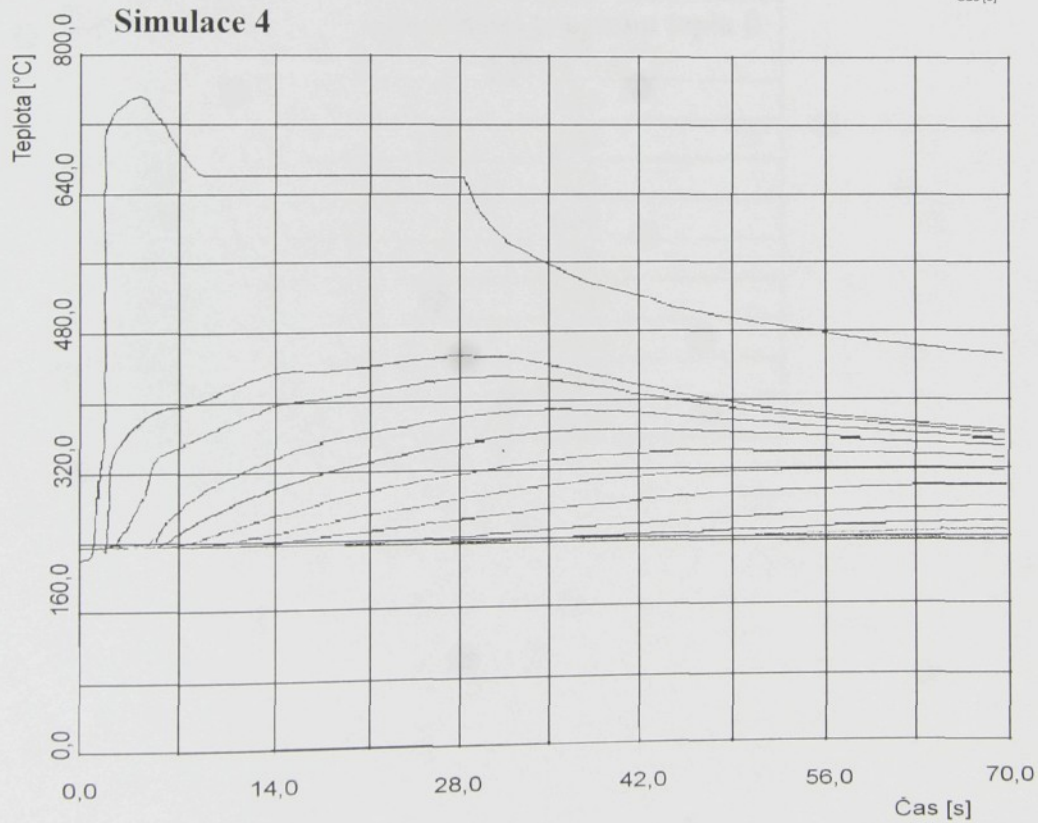
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	90
100	120
200	200
300	250
400	380
500	1000
600	1900
700	2550
800	2550

Měření 4



Simulace 4



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 5

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	AlSi 13
Teplota likvidu	561
Teplota solidu [°C]	560
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	401 900
Teplota kokily [°C]	18
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	Bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	18
Teplota dna formy [°C]	18
Izolační materiál dna formy	Síbral

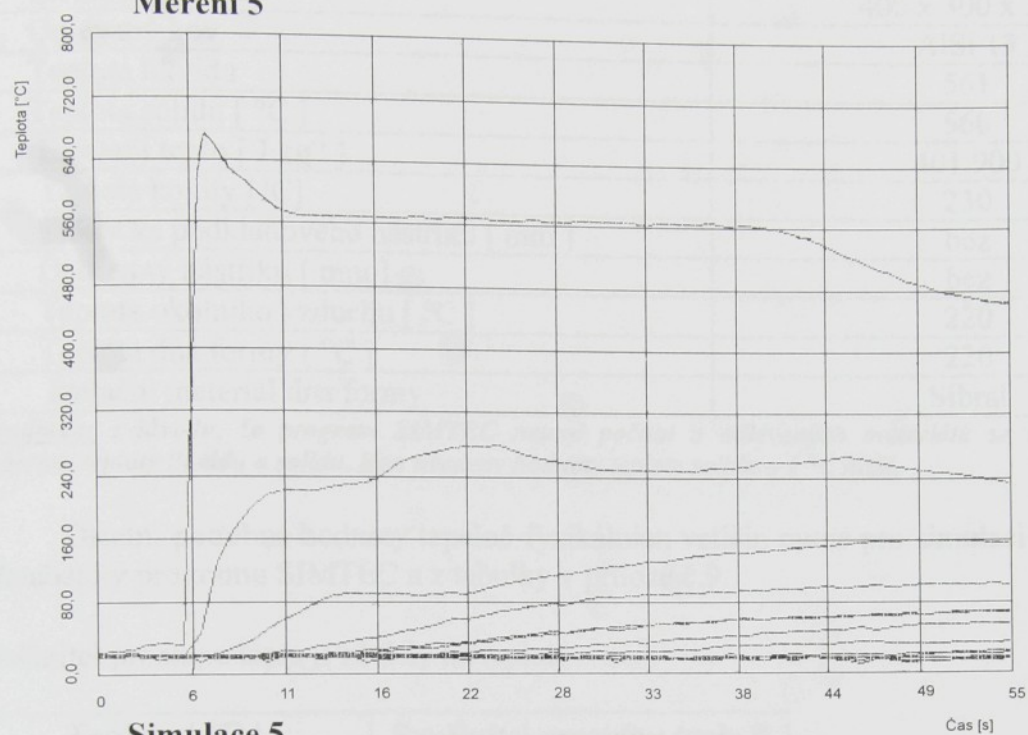
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	100
100	200
200	300
300	600
400	850
500	1100
600	2500
700	3800
800	3800

Měření 5



Simulace 5



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 6

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	AlSi 13
Teplota likvidu	561
Teplota solidu [°C]	560
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	401 900
Teplota kokily [°C]	230
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	220
Teplota dna formy [°C]	220
Izolační materiál dna formy	Sibral

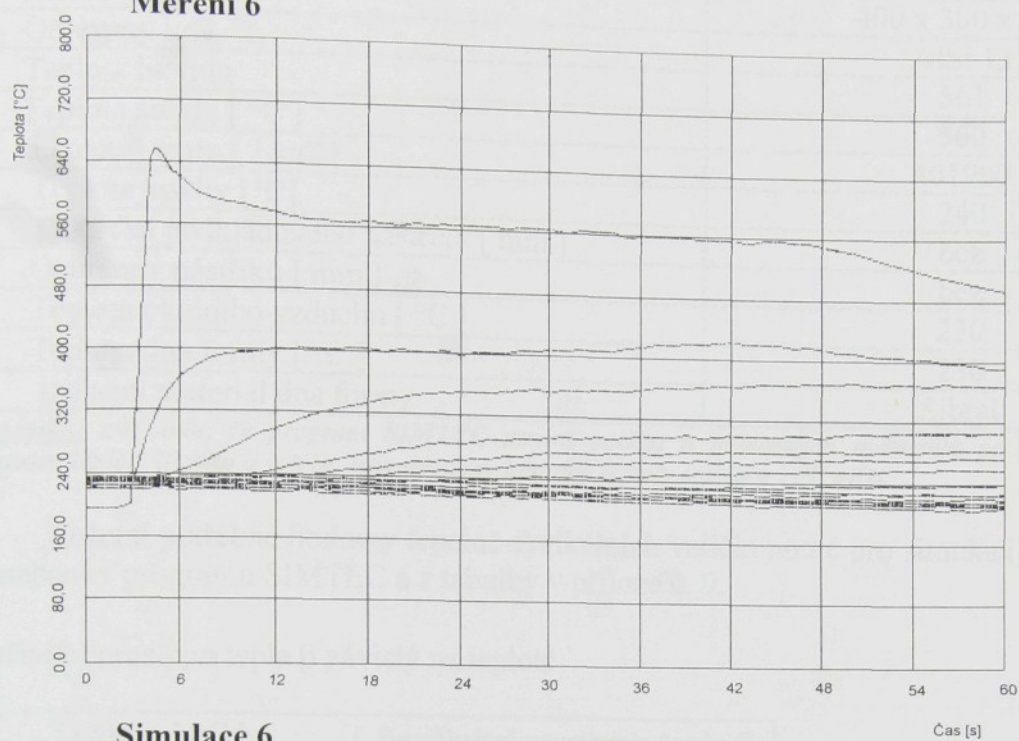
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	100
100	150
200	200
300	450
400	640
500	800
600	2100
700	3500
800	3500

Měření 6



Simulace 6



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 7

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odlévaný kov	AlSi 13
Teplota likvidu	561
Teplota solidu [°C]	560
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	401900
Teplota kokily [°C]	240
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	230
Teplota dna formy [°C]	230
Izolační materiál dna formy	Sibral

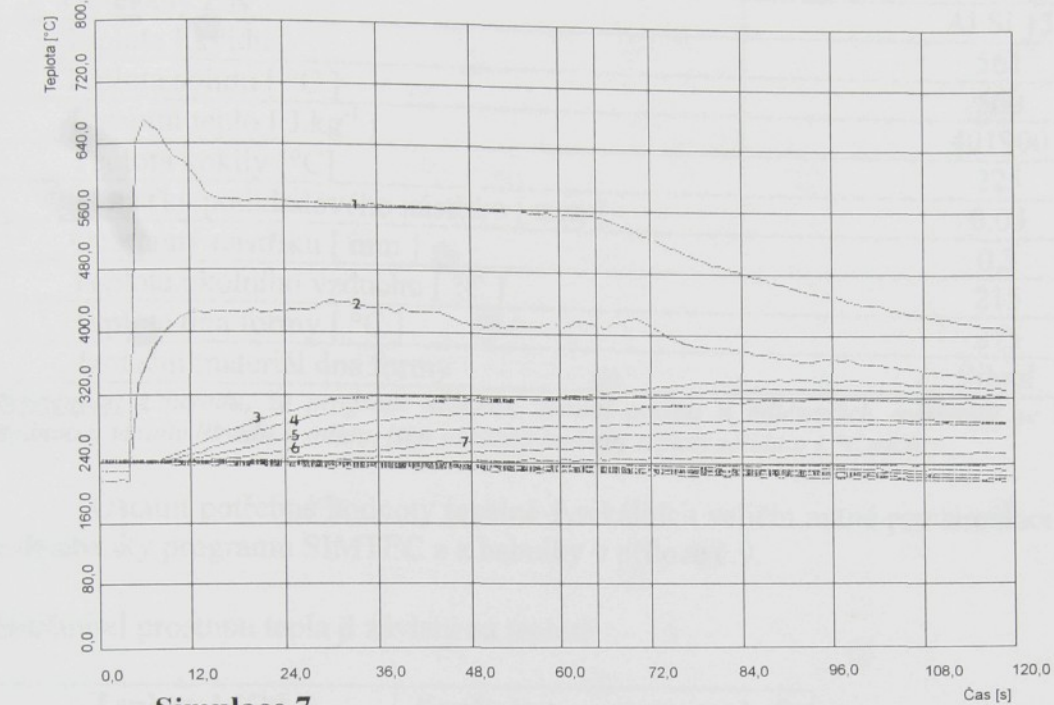
***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévaných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č. 9.

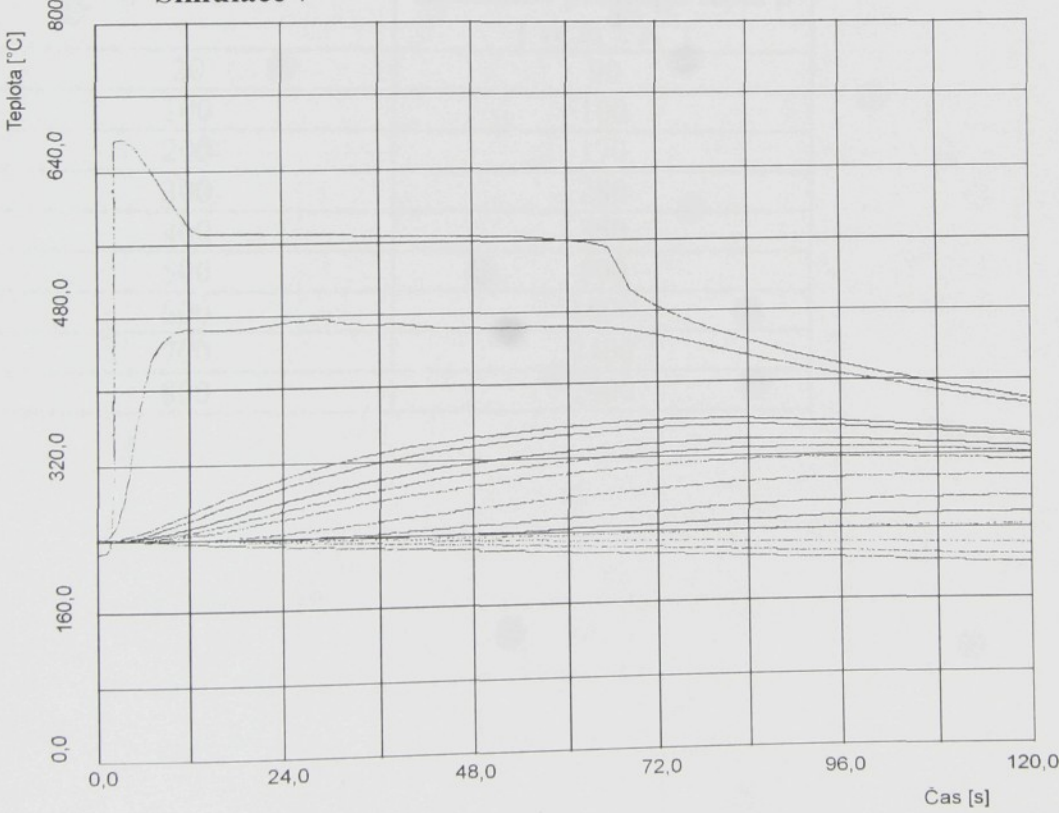
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m⁻². K⁻¹]
20	100
100	150
200	200
300	410
400	490
500	750
600	2100
700	3400
800	3400

Měření 7



Simulace 7



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 8

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	Al Si 13
Teplota likvidu	561
Teplota solidu [°C]	560
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	401900
Teplota kokily [°C]	225
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	215
Teplota dna formy [°C]	215
Izolační materiál dna formy	Sibral

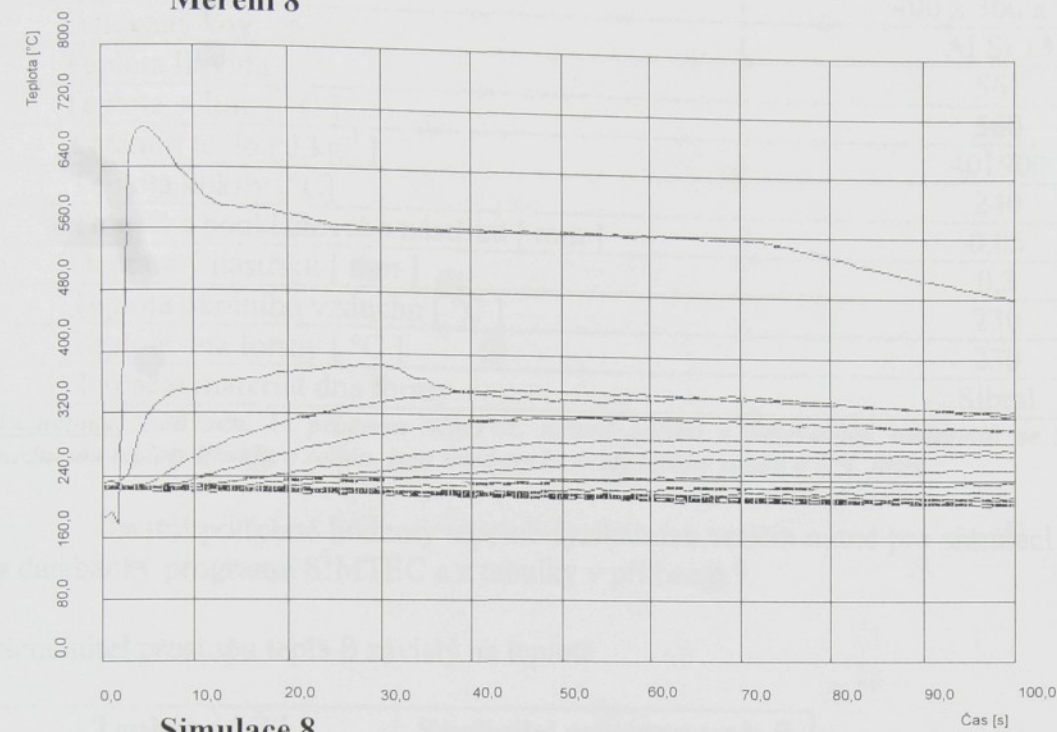
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z babulky v příloze č.9.

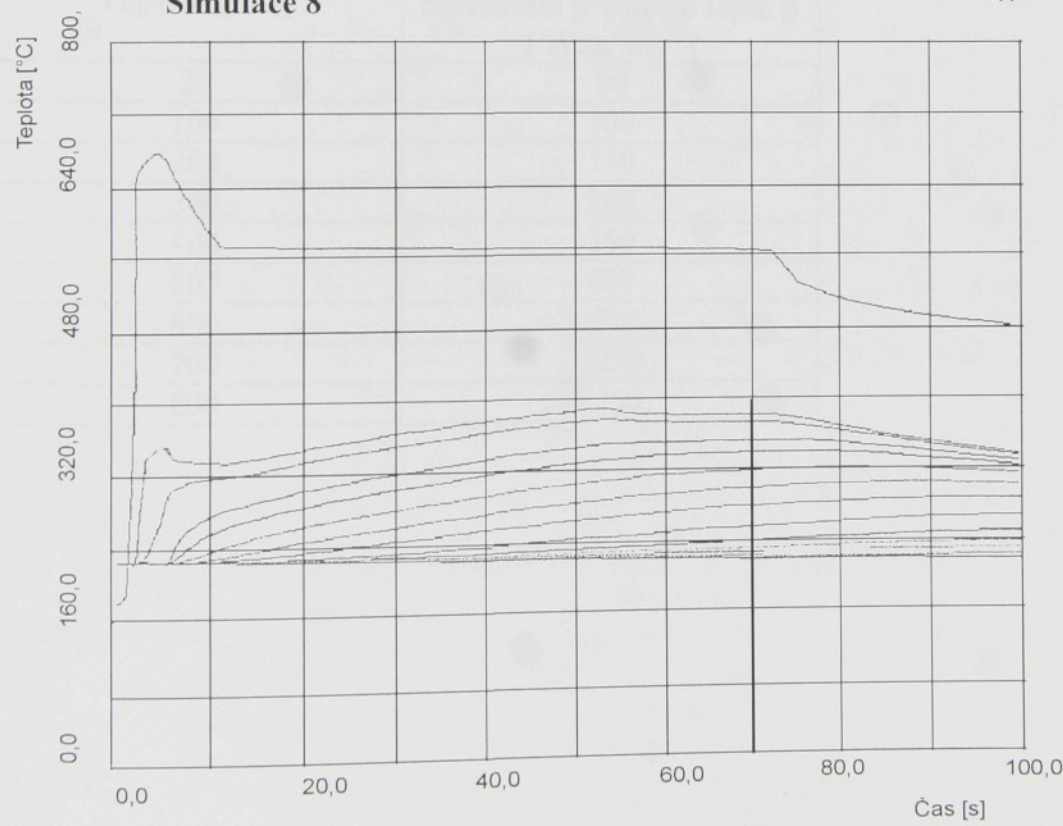
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	90
100	100
200	170
300	280
400	350
500	500
600	1800
700	2400
800	2400

Měření 8



Simulace 8



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 9

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	Al Si 13
Teplota likvidu	561
Teplota solidu [°C]	560
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	401900
Teplota kokily [°C]	240
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	230
Teplota dna formy [°C]	230
Izolační materiál dna formy	Sibral

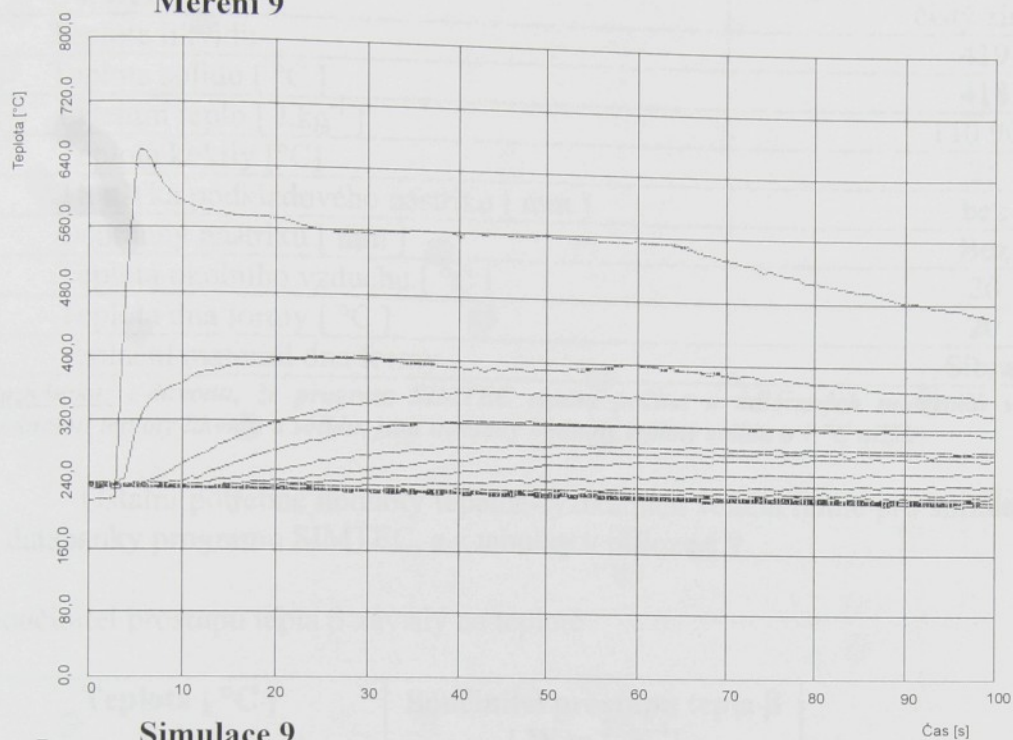
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC a z tabulky v příloze č.9.

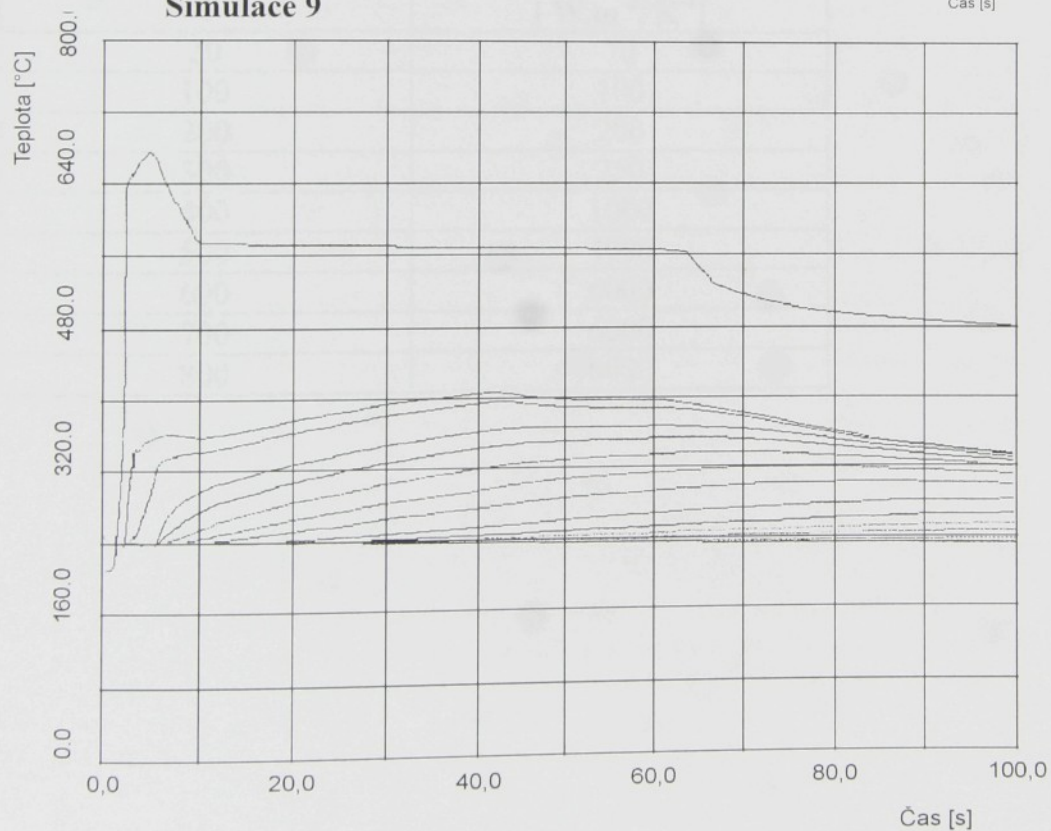
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	90
100	100
200	150
300	200
400	350
500	400
600	1700
700	2250
800	2250

Měření 9



Simulace 9



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 10

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čistý zinek
Teplota likvidu	419
Teplota solidu [°C]	418
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	110 900
Teplota kokily [°C]	25
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	Bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	20
Teplota dna formy [°C]	20
Izolační materiál dna formy	Sibral

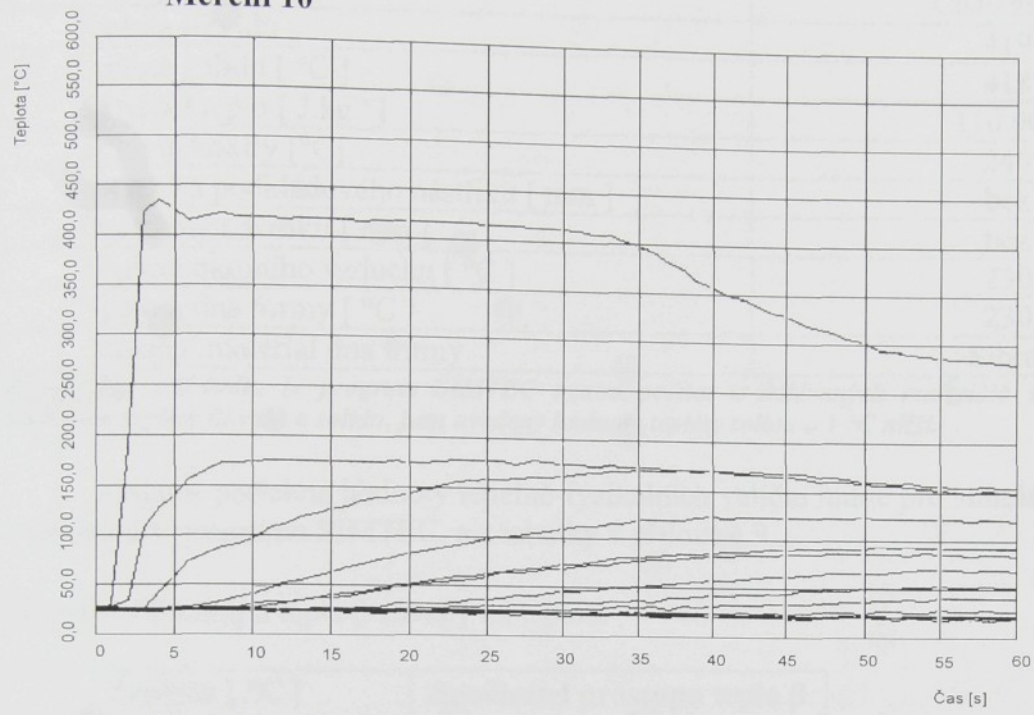
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky v příloze č.9.

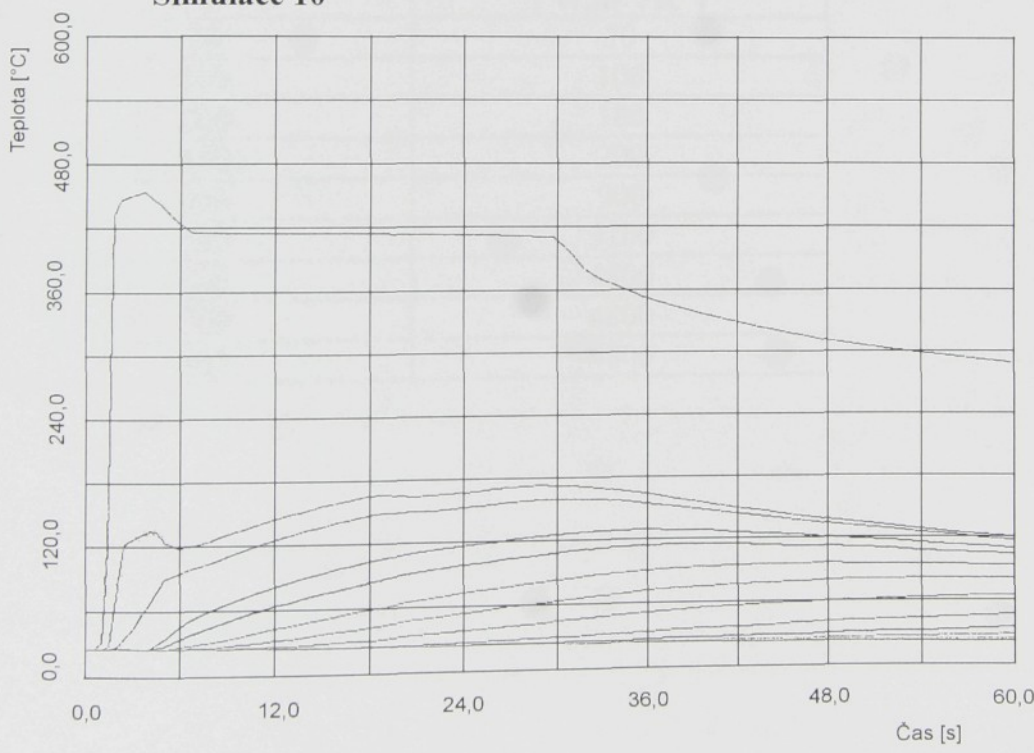
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	70
100	100
200	200
300	250
400	1000
500	4000
600	6000
700	6000
800	6000

Měření 10



Simulace 10



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 11

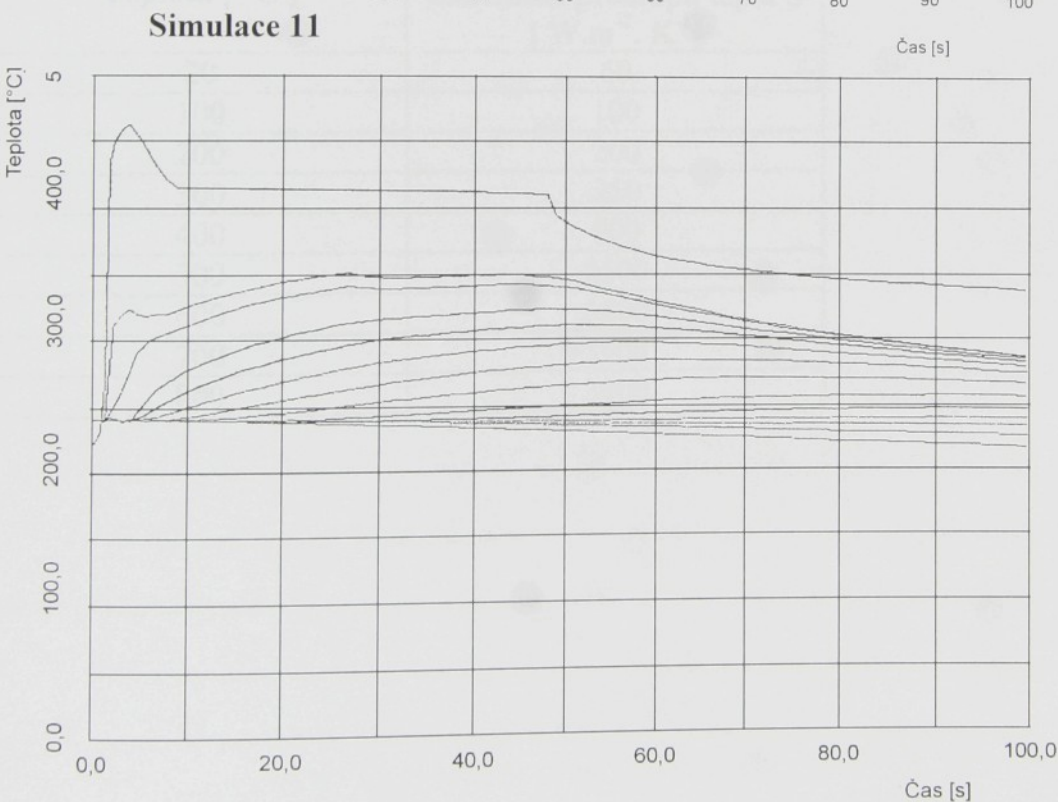
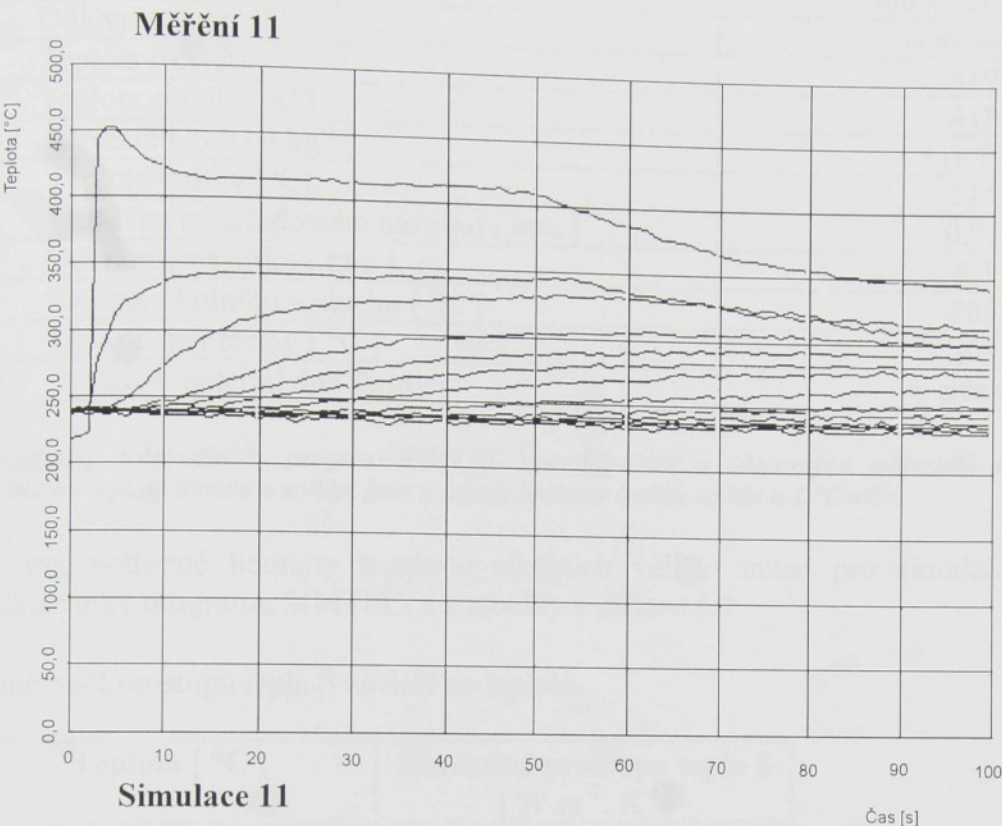
Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	Čistý zinek
Teplota likvidu	419
Teplota solidu [°C]	418
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	110 900
Teplota kokily [°C]	240
Tloušťka podkladového nástříku [mm]	bez
Ochranný nástříku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	230
Teplota dna formy [°C]	230
Izolační materiál dna formy	Sibral

***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	70
100	100
200	180
300	200
400	900
500	3100
600	4800
700	4800
800	4800



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 12

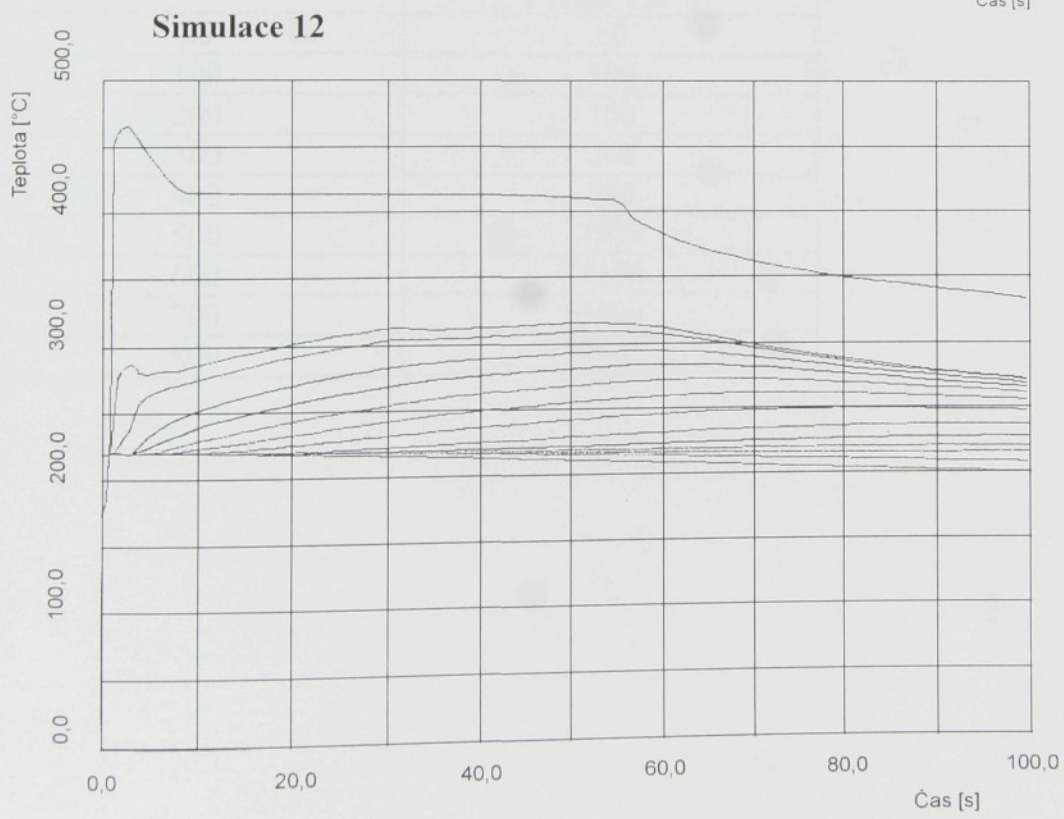
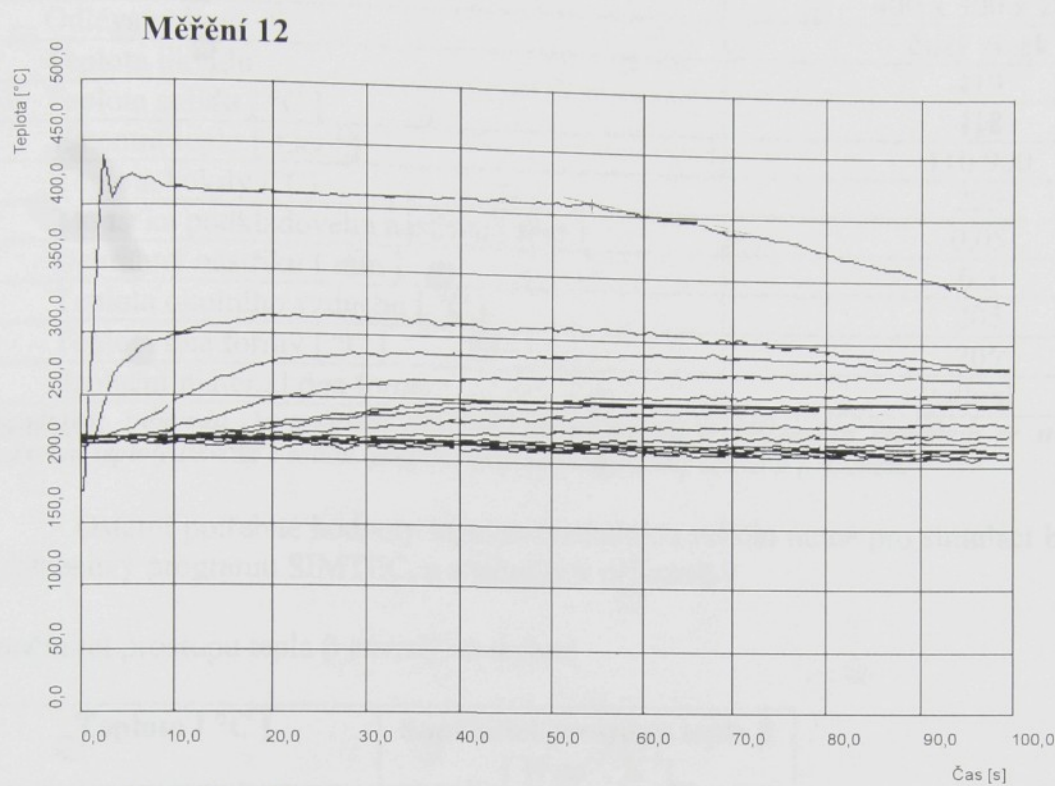
Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čistý zinek
Teplota likvidu	419
Teplota solidu [°C]	418
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	110 900
Teplota kokily [°C]	215
Tloušťka podkladového nástříku [mm]	0,05
Ochranný nástříku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	205
Teplota dna formy [°C]	205
Izolační materiál dna formy	sibral

***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévaných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	60
100	100
200	200
300	250
400	900
500	2500
600	3800
700	3900
800	3900



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 13

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odlévání kov	čistý zinek
Teplota likvidu	419
Teplota solidu [°C]	418
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	110 900
Teplota kokily [°C]	225
Tloušťka podkladového nástríku [mm]	0,05
Ochranný nástríku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	205
Teplota dna formy [°C]	205
Izolační materiál dna formy	sibral

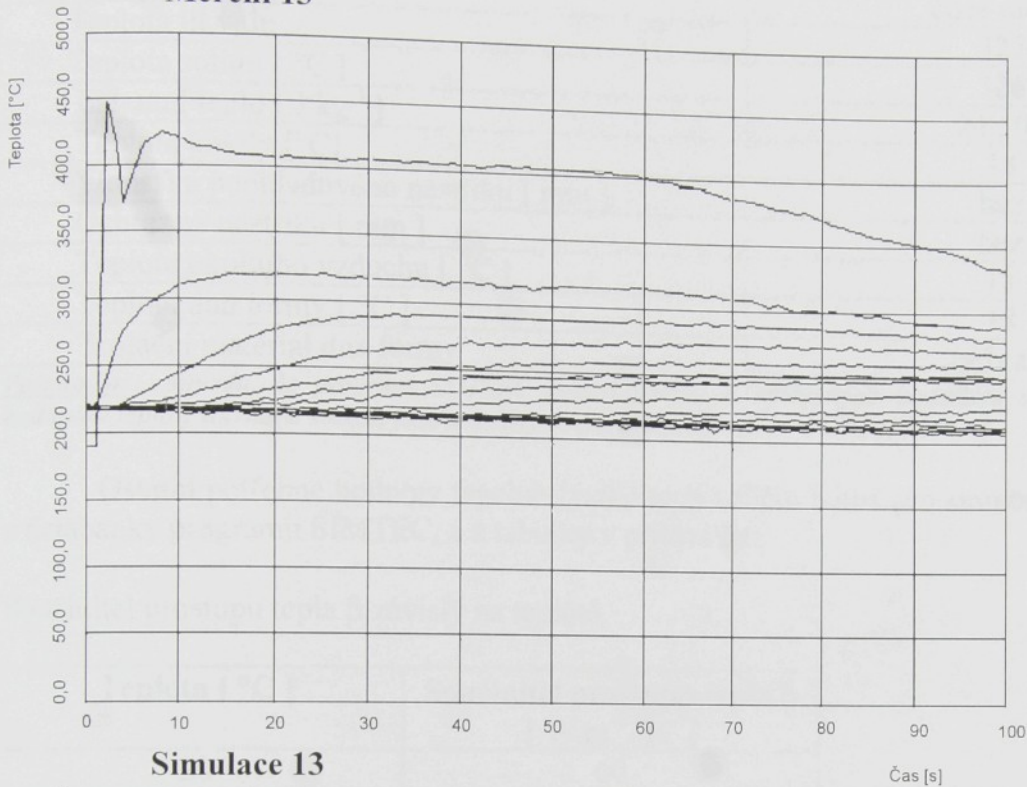
***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévání materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	50
100	100
200	150
300	200
400	750
500	1950
600	3400
700	3600
800	3600

Měření 13



Simulace 13



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 14

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čisté olovo
Teplota likvidu	327
Teplota solidu [°C]	326
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	24 500
Teplota kokily [°C]	18
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	18
Teplota dna formy [°C]	18
Izolační materiál dna formy	sibral

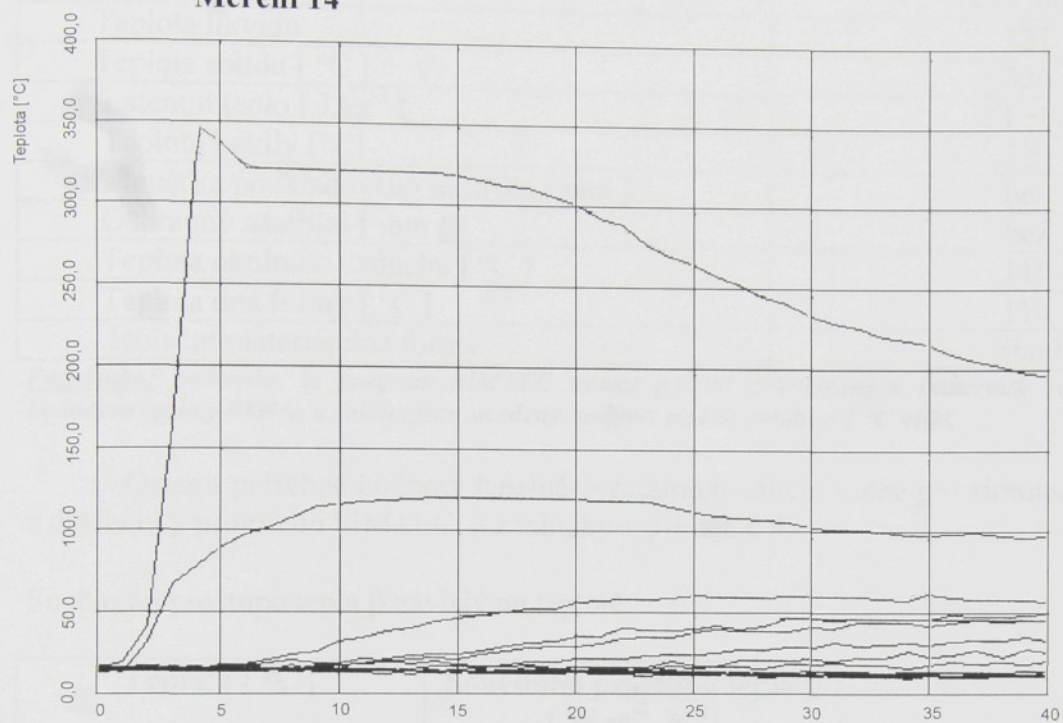
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky v příloze č.9.

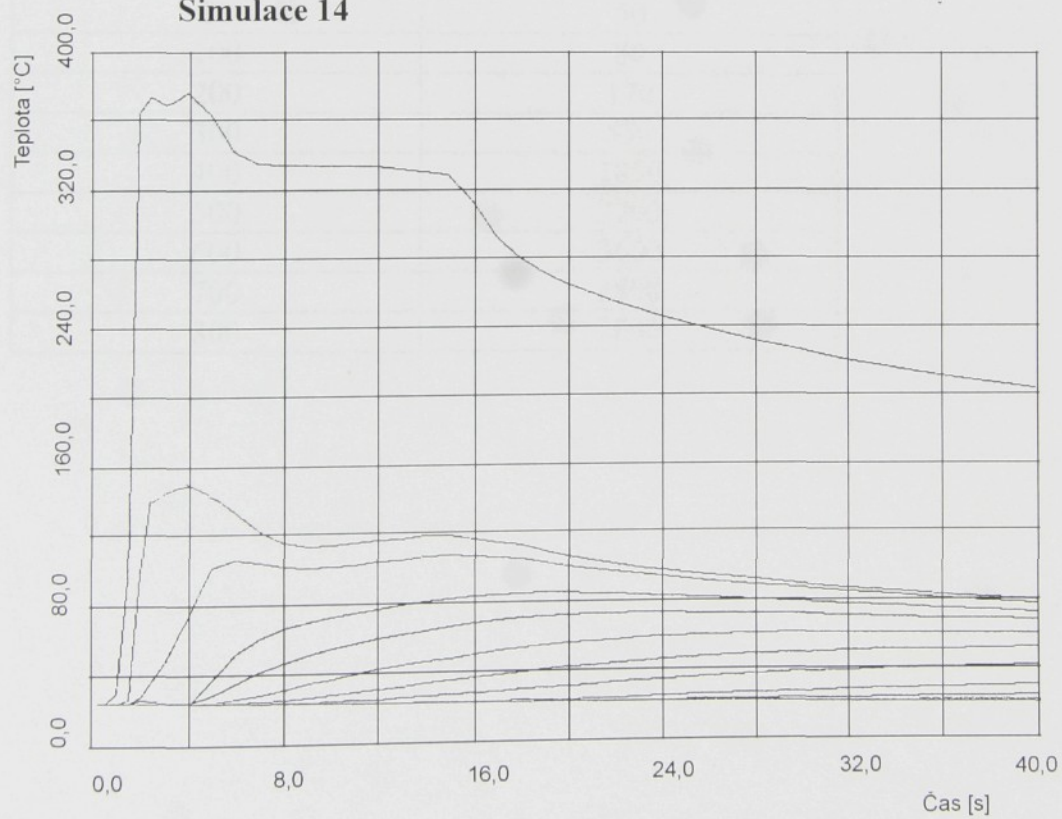
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	60
100	90
200	190
300	600
400	2000
500	3100
600	4500
700	4500
800	4500

Měření 14



Simulace 14



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 15

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čisté olovo
Teplota likvidu	327
Teplota solidu [°C]	326
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	24 500
Teplota kokily [°C]	120
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	bez
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	110
Teplota dna formy [°C]	110
Izolační materiál dna formy	sibral

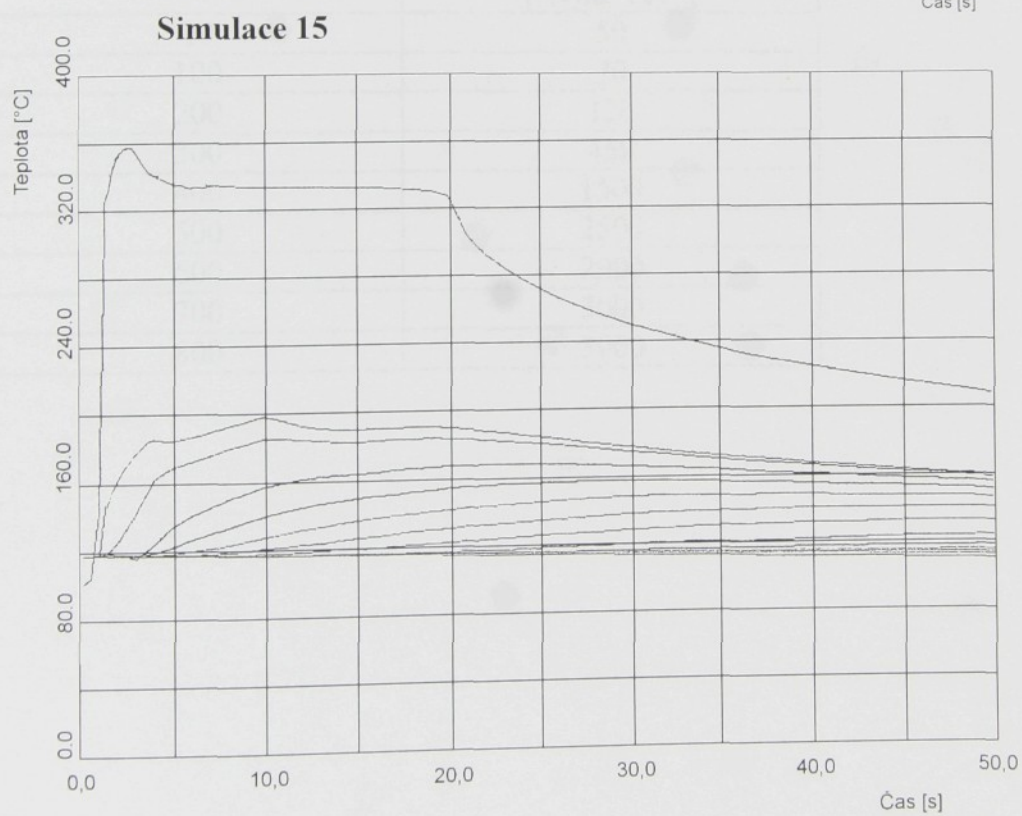
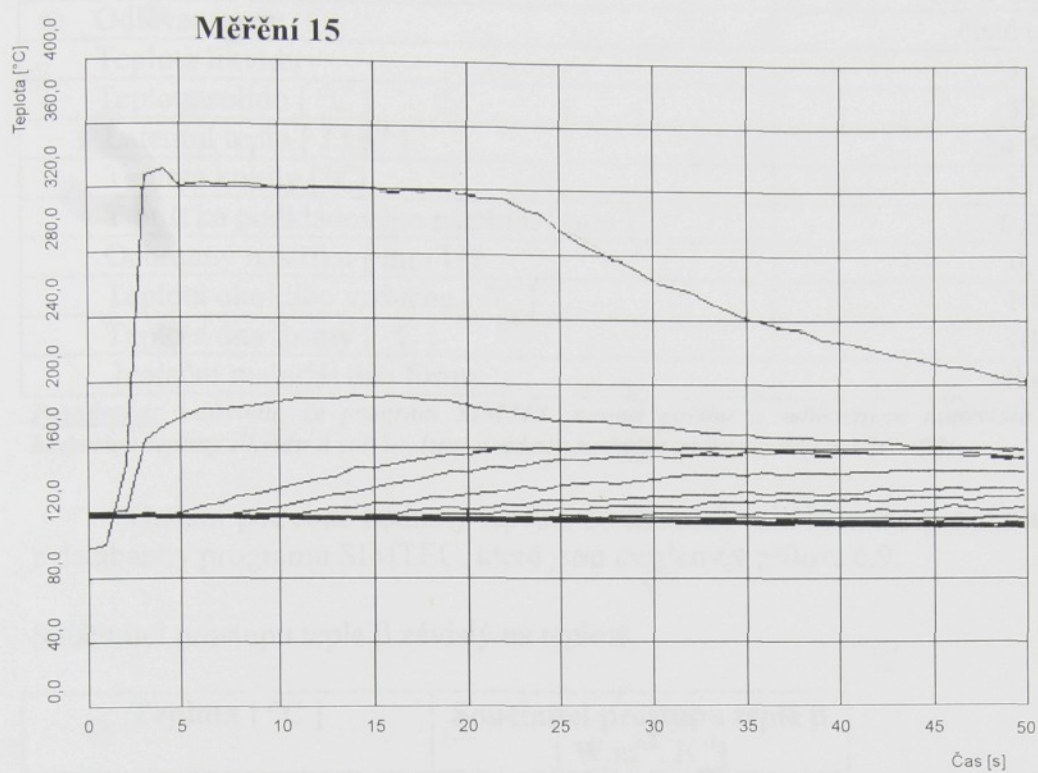
Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odléváných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	50
100	80
200	170
300	550
400	1850
500	2700
600	3600
700	3800
800	3800

Porovnání měření a simulace



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 16

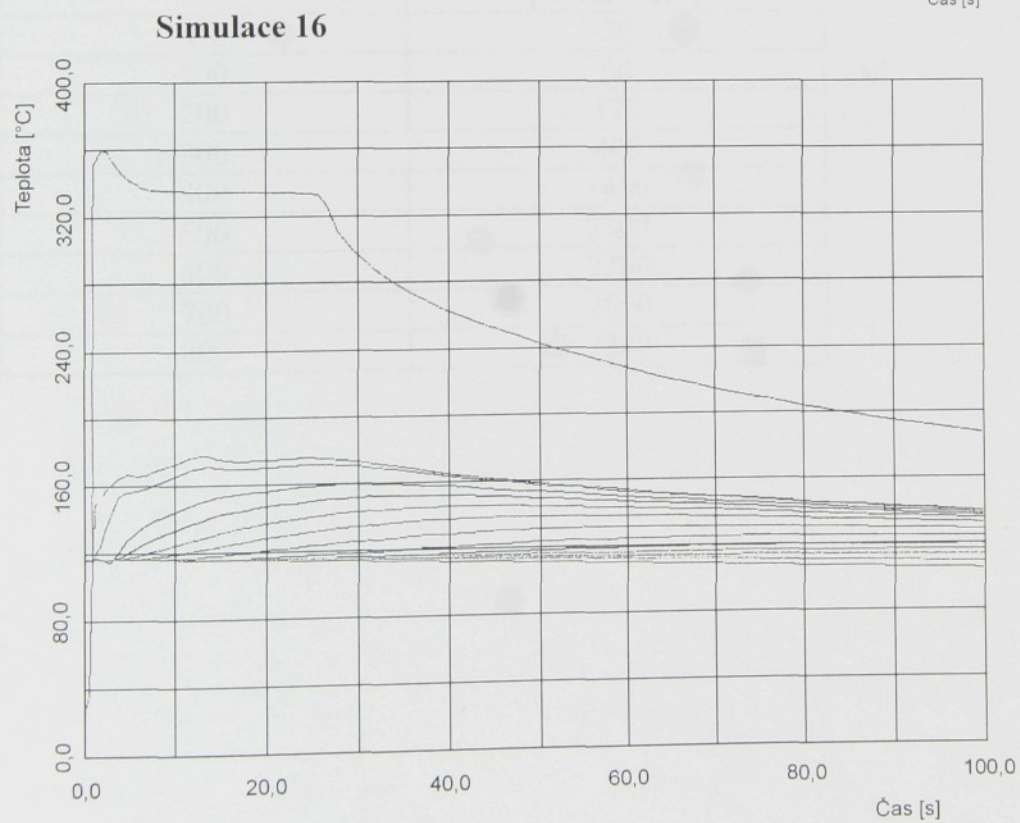
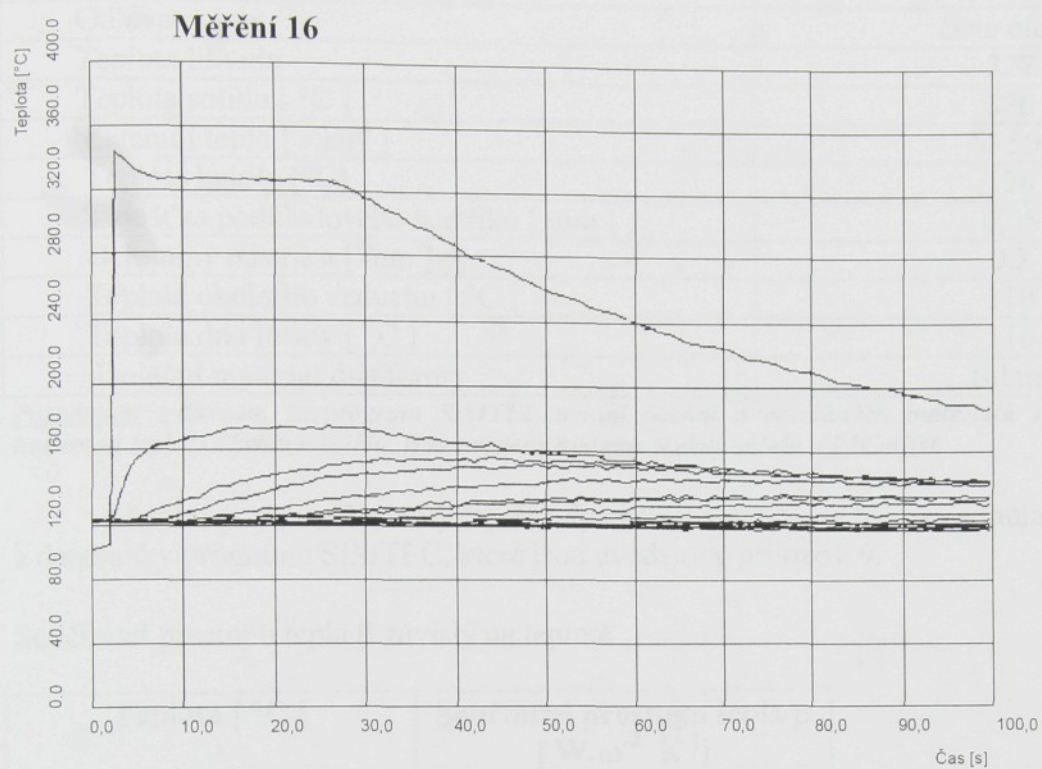
Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čisté olovo
Teplota likvidu	327
Teplota solidu [°C]	326
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	24 500
Teplota kokily [°C]	115
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	105
Teplota dna formy [°C]	105
Izolační materiál dna formy	sibral

Poznámka: z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévaných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, které jsou uvedeny v příloze č.9.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	50
100	70
200	130
300	450
400	1500
500	2500
600	2900
700	3000
800	3000



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. 17

Litinová kokila	400 x 300 x 200
Odléváný kov	čisté olovo
Teplota likvidu	327
Teplota solidu [°C]	326
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	24 500
Teplota kokily [°C]	120
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,3
Teplota okolního vzduchu [°C]	110
Teplota dna formy [°C]	110
Izolační materiál dna formy	Sibral

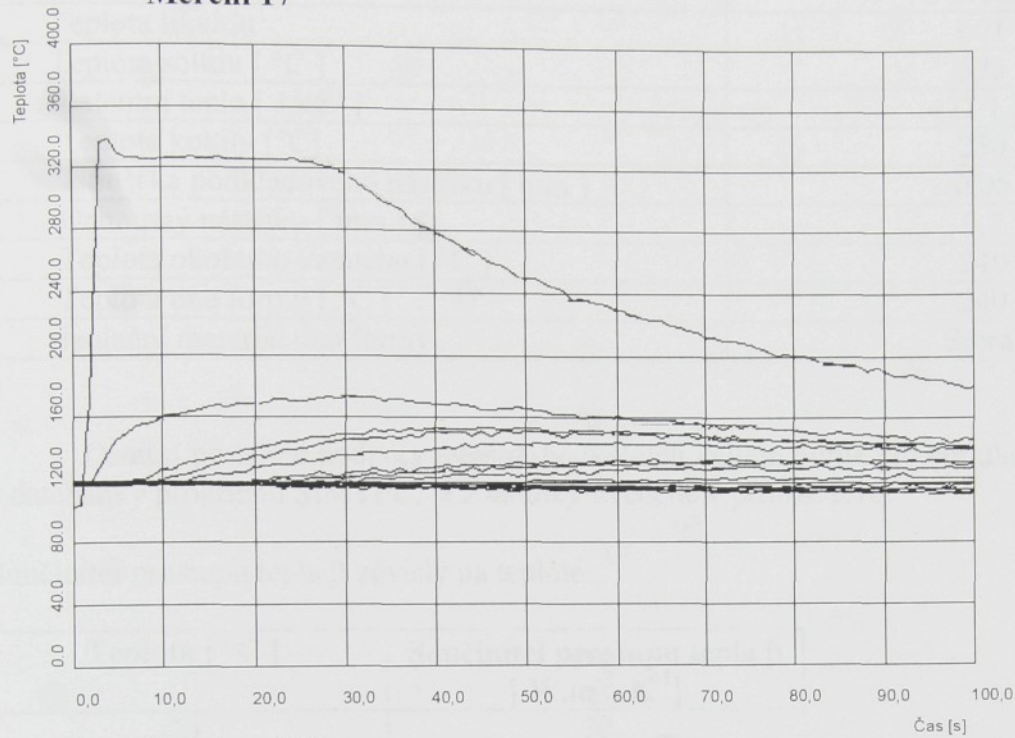
***Poznámka:** z důvodu, že program SIMTEC neumí počítat u odlévaných materiálů se stejnou teplotou hodnotou teploty likvidu a solidu, jsou uvedeny hodnoty teploty solidu o 1 °C nižší.*

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, které jsou uvedeny v příloze č.9.

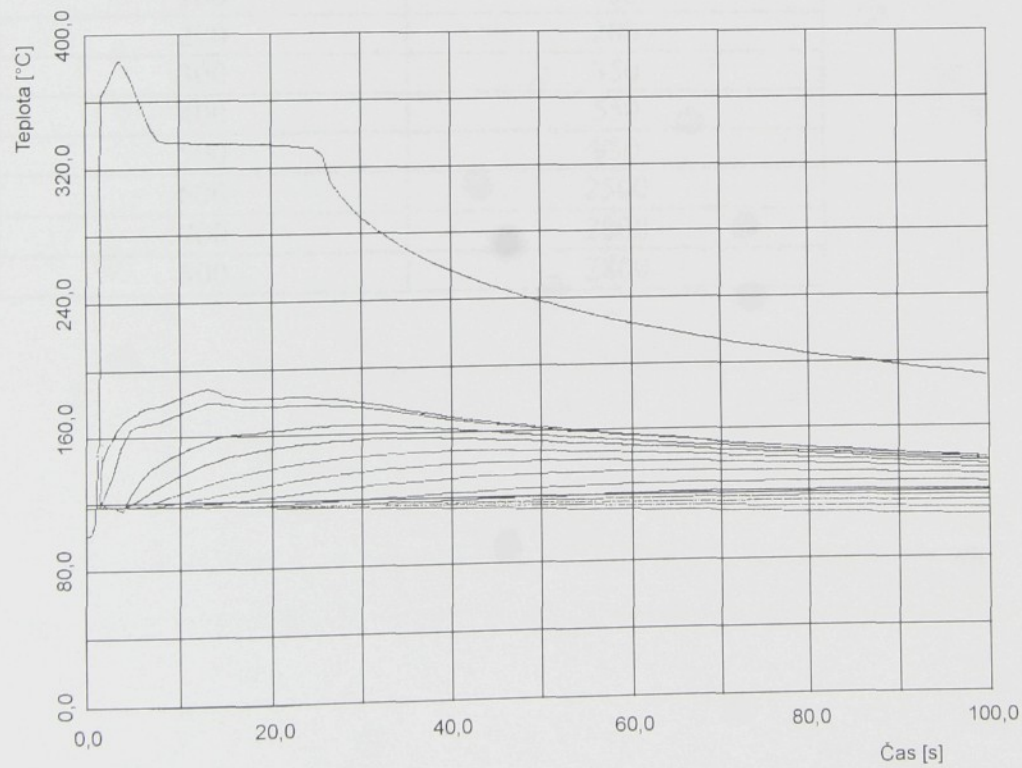
Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m⁻². K⁻¹]
20	50
100	60
200	120
300	400
400	1400
500	2300
600	2700
700	2800
800	2800

Měření 17



Simulace 17



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. I

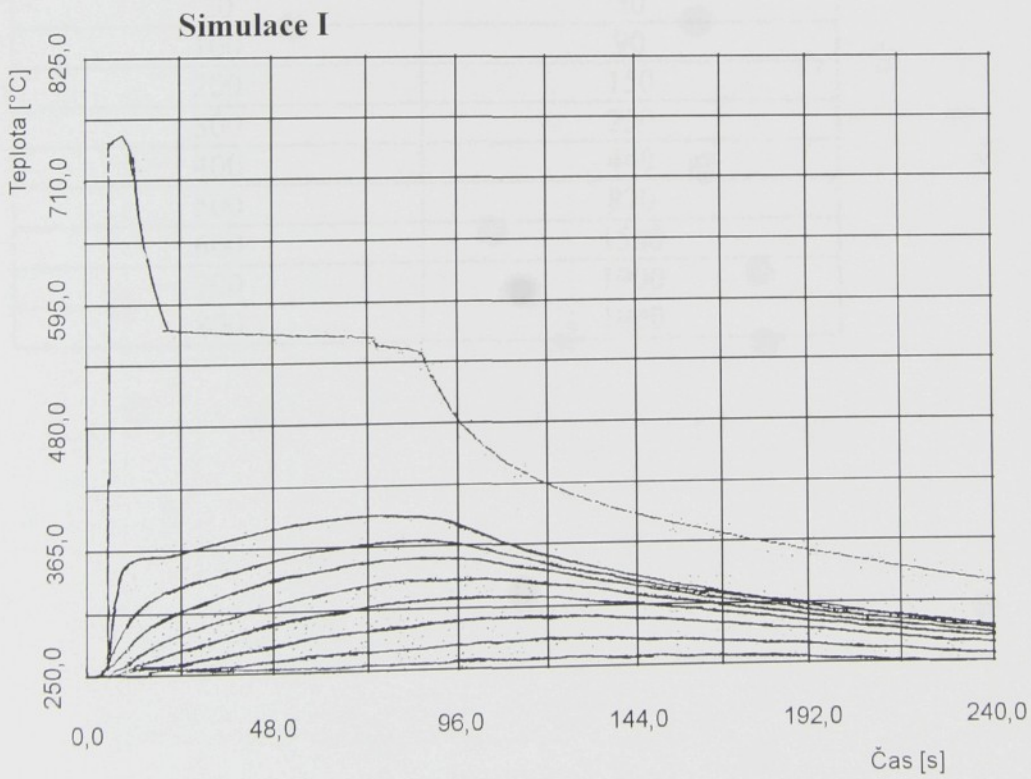
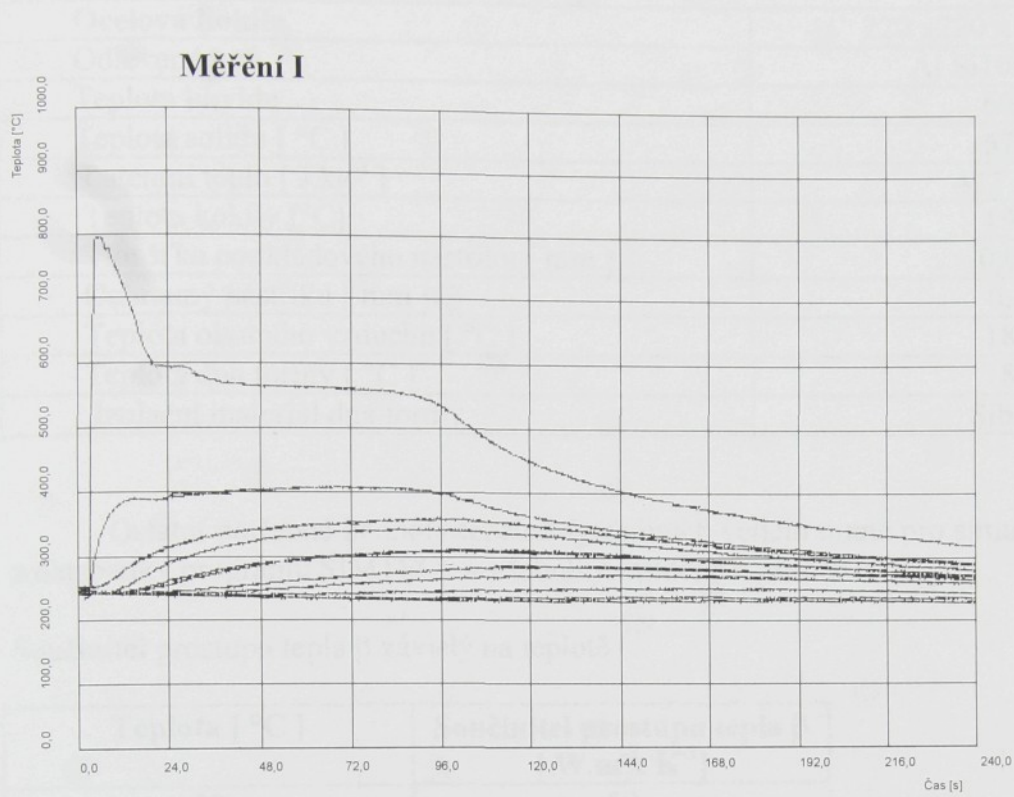
Ocelová kokila	220 x 220 x 220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10Mg
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Teplota kokily [°C]	250
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,2
Teplota okolního vzduchu [°C]	240
Teplota dna formy [°C]	240
Izolační materiál dna formy	Sibral

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m⁻². K⁻¹]
20	70
100	100
200	200
300	350
400	550
500	950
600	2500
700	2800
800	2800

Porovnání měření a simulace



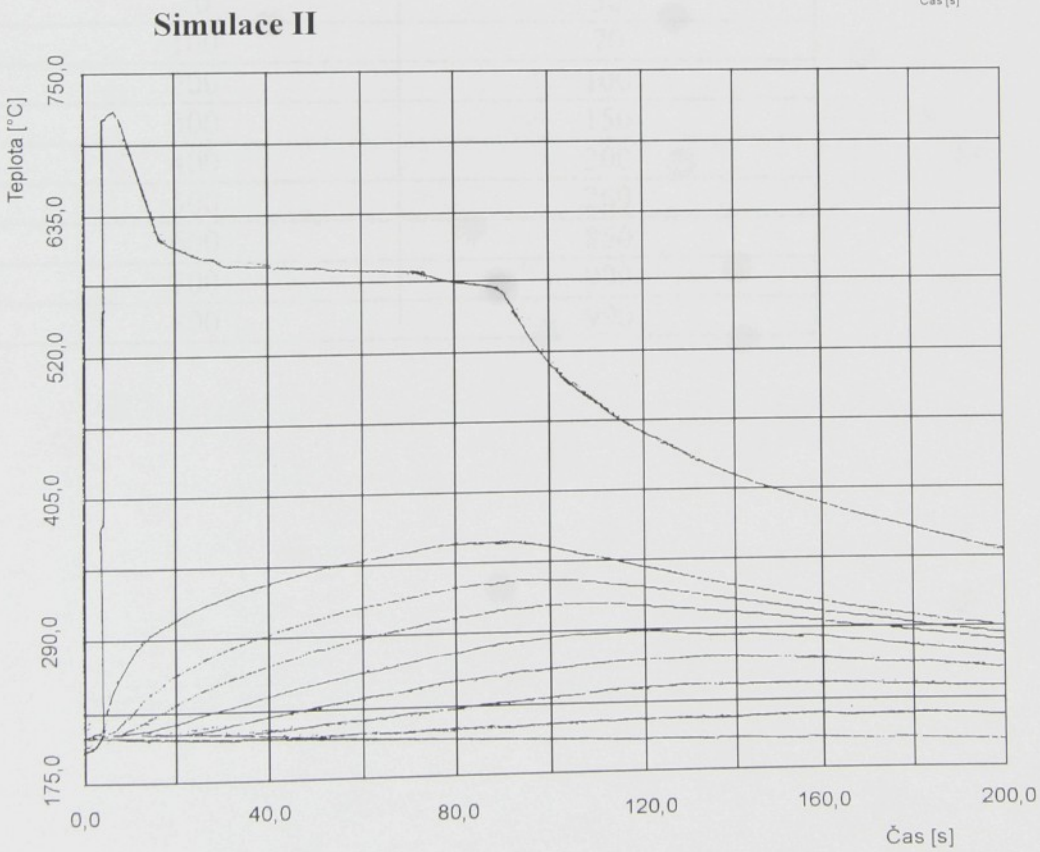
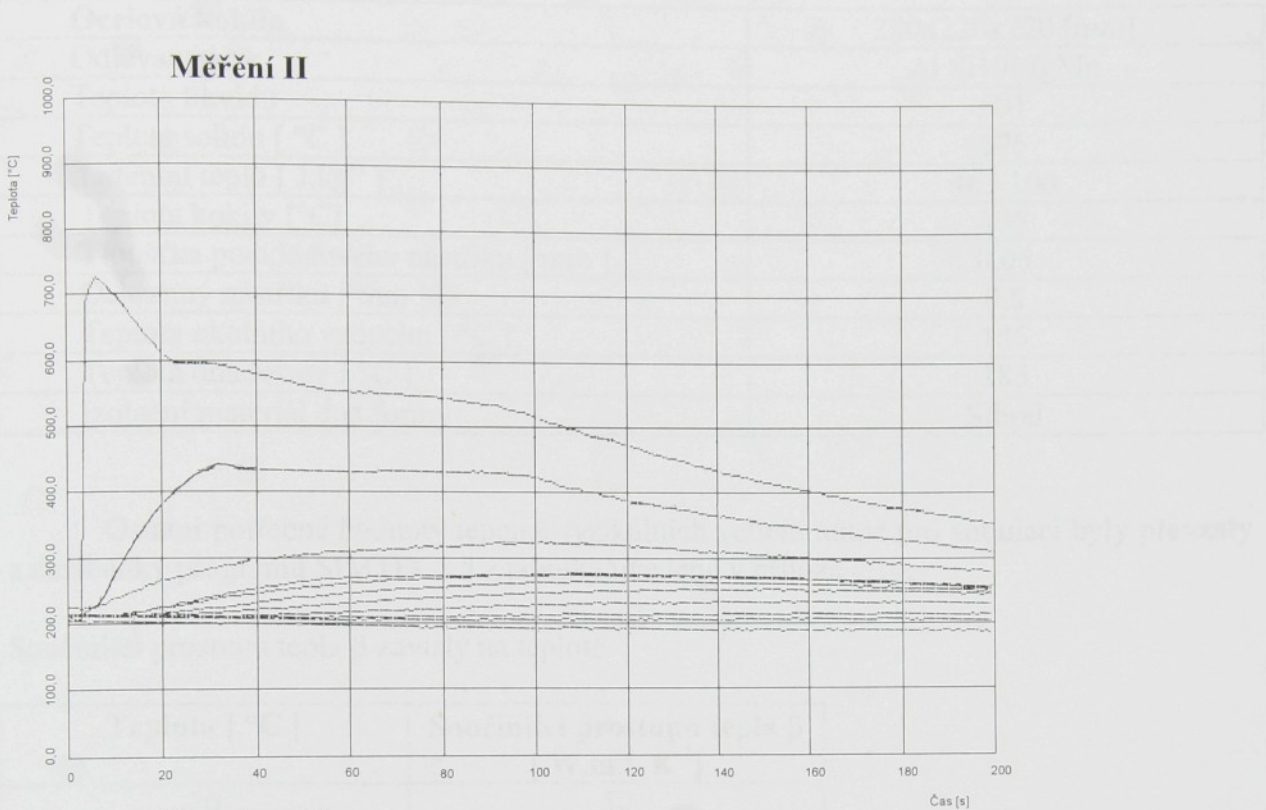
HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. II

Ocelová kokila	220 x 220 x 220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10MgMn
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Teplota kokily [°C]	190
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,4
Teplota okolního vzduchu [°C]	180
Teplota dna formy [°C]	180
Izolační materiál dna formy	Sibral

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	50
100	90
200	150
300	250
400	440
500	870
600	1500
700	1900
800	1900



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. III

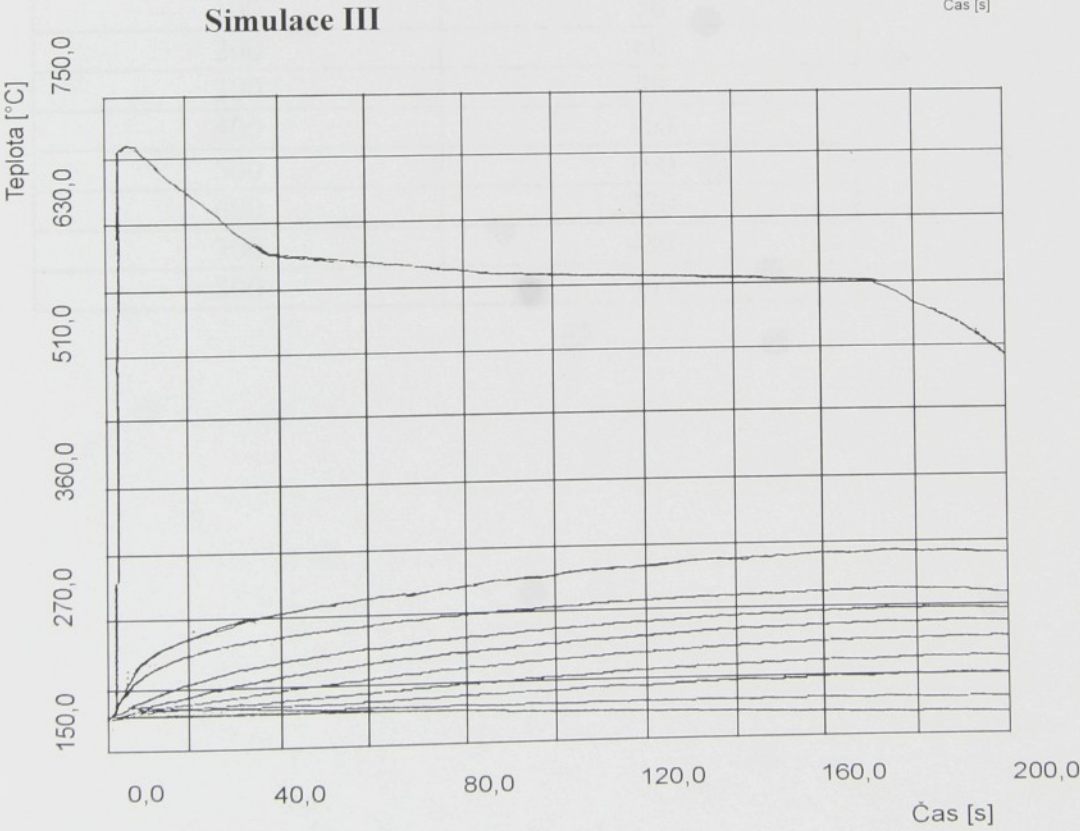
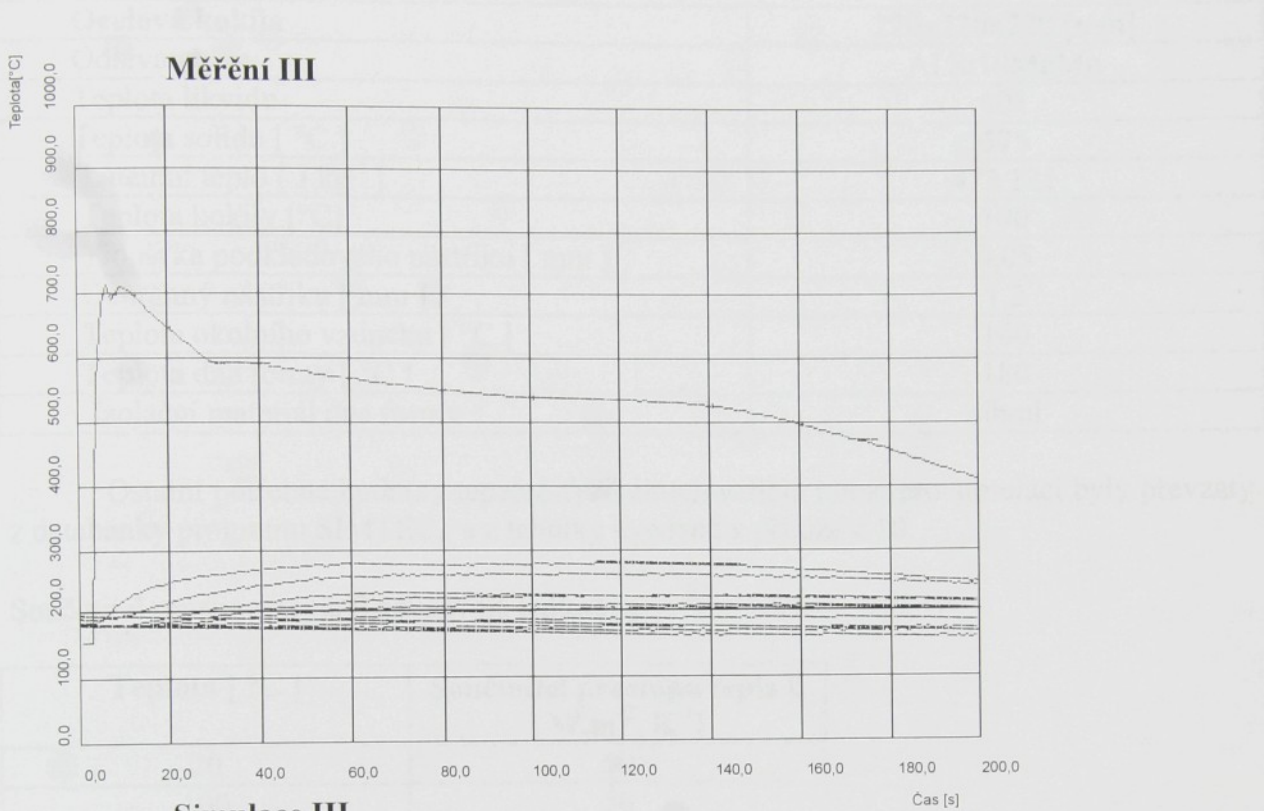
Ocelová kokila	220x220x220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10MgMn
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	463 100
Teplota kokily [°C]	195
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	0,8
Teplota okolního vzduchu [°C]	185
Teplota dna formy [°C]	185
Izolační materiál dna formy	Sibral

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	50
100	70
200	100
300	150
400	200
500	280
600	850
700	990
800	990

Porovnání měření a simulace



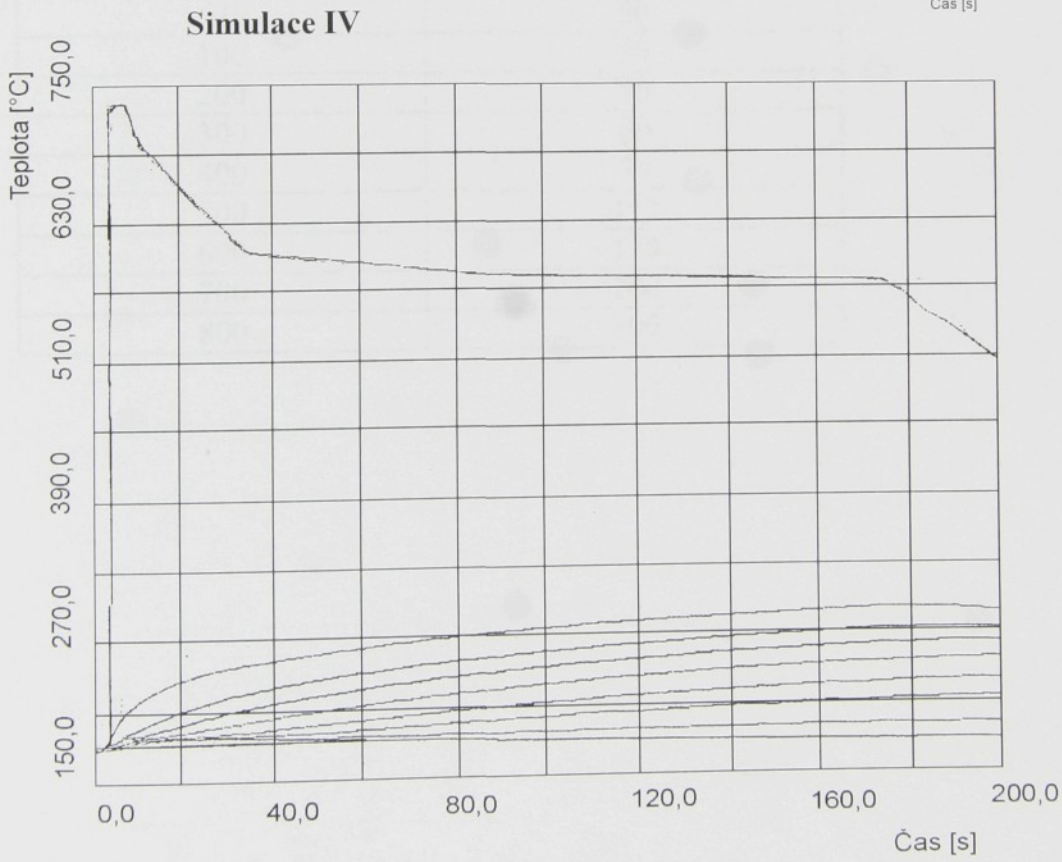
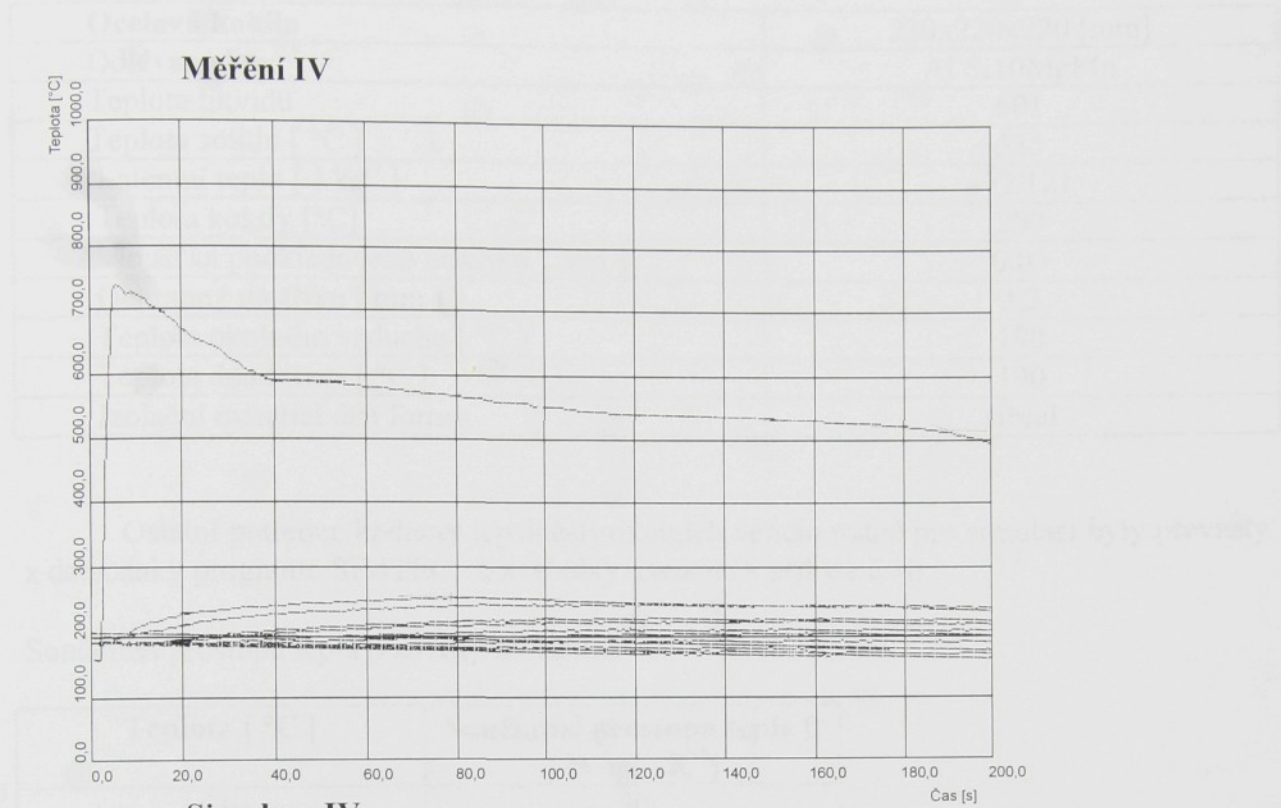
HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. IV

Ocelová kokila	220x220x220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10MgMn
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Teplota kokily [°C]	190
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	1,2
Teplota okolního vzduchu [°C]	180
Teplota dna formy [°C]	180
Izolační materiál dna formy	sibral

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m⁻². K⁻¹]
20	50
100	50
200	60
300	80
400	160
500	190
600	220
700	480
800	480



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. V

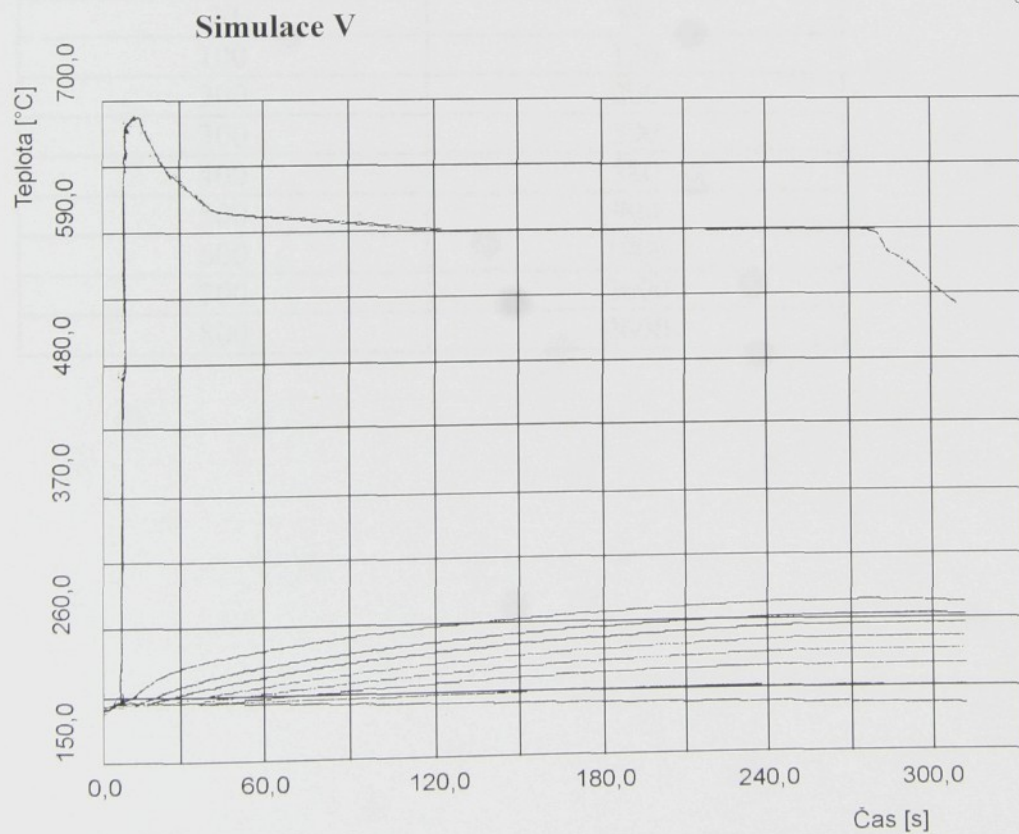
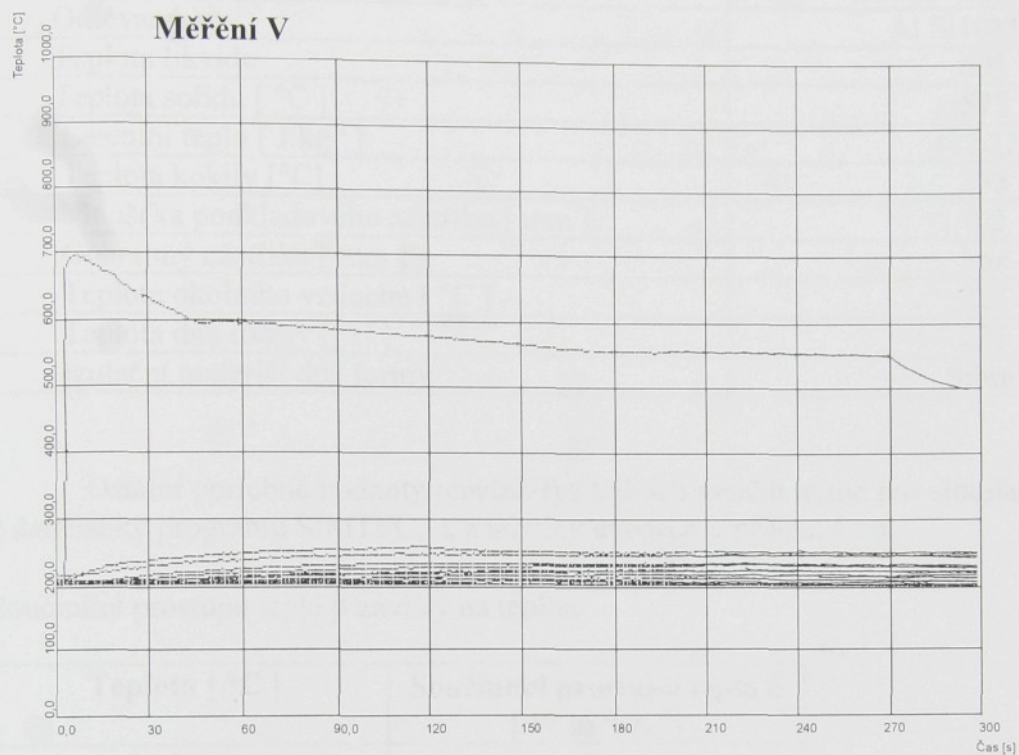
Ocelová kokila	220x220x220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10MgMn
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Teplota kokily [°C]	200
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,05
Ochranný nástřiku [mm]	2,2
Teplota okolního vzduchu [°C]	190
Teplota dna formy [°C]	190
Izolační materiál dna formy	sibral

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m⁻². K⁻¹]
20	20
100	30
200	50
300	60
400	70
500	110
600	130
700	200
800	200

Porovnání měření a simulace



HODNOTY PRO SIMULAČNÍ VÝPOČET - MĚŘENÍ č. VI

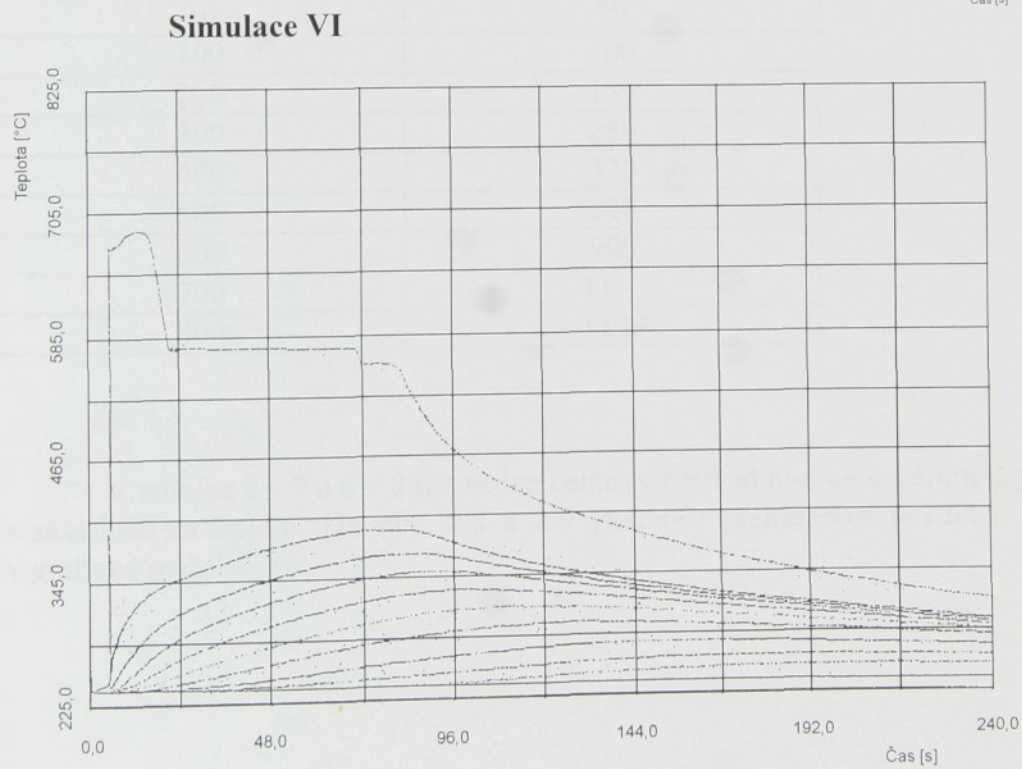
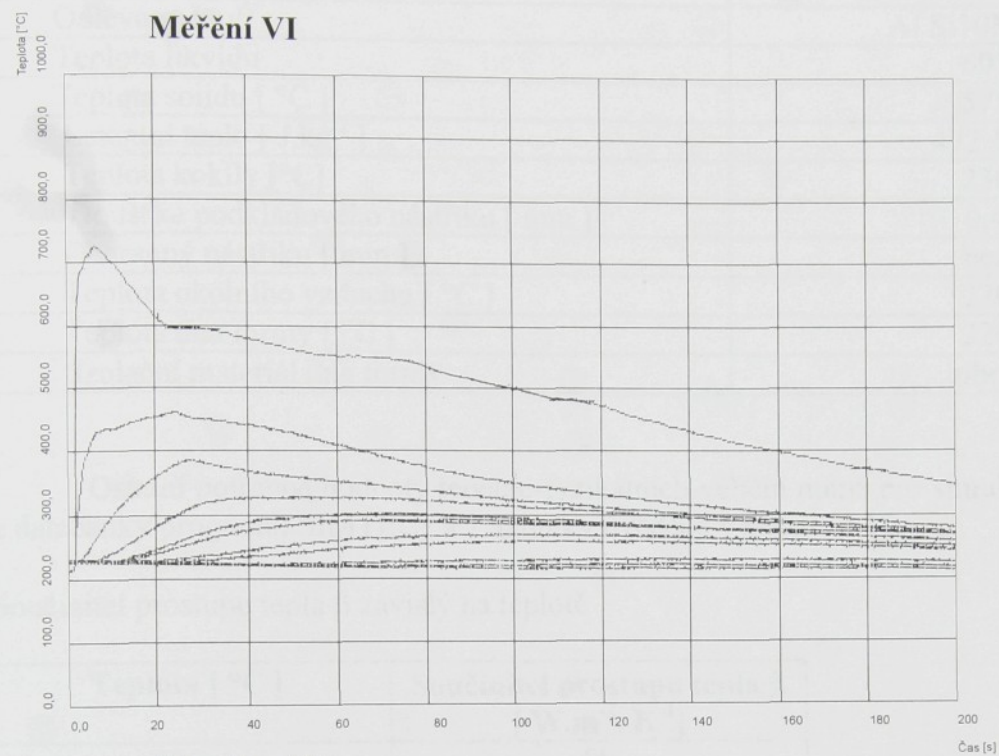
Ocelová kokila	220x220x220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10MgMn
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Teplota kokily [°C]	235
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,2
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	225
Teplota dna formy [°C]	225
Izolační materiál dna formy	Sibral

Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	90
100	120
200	200
300	300
400	380
500	900
600	1900
700	2600
800	2600

Porovnání měření a simulace



SIMULAČNÍ VÝPOČET K MĚŘENÍ VII

Ocelová kokila	220x220x220 [mm]
Odlévaný kov	Al Si10MgMn
Teplota likvidu	601
Teplota solidu [°C]	575
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Teplota kokily [°C]	230
Tloušťka podkladového nástřiku [mm]	0,4
Ochranný nástřiku [mm]	bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	220
Teplota dna formy [°C]	220
Izolační materiál dna formy	sibral

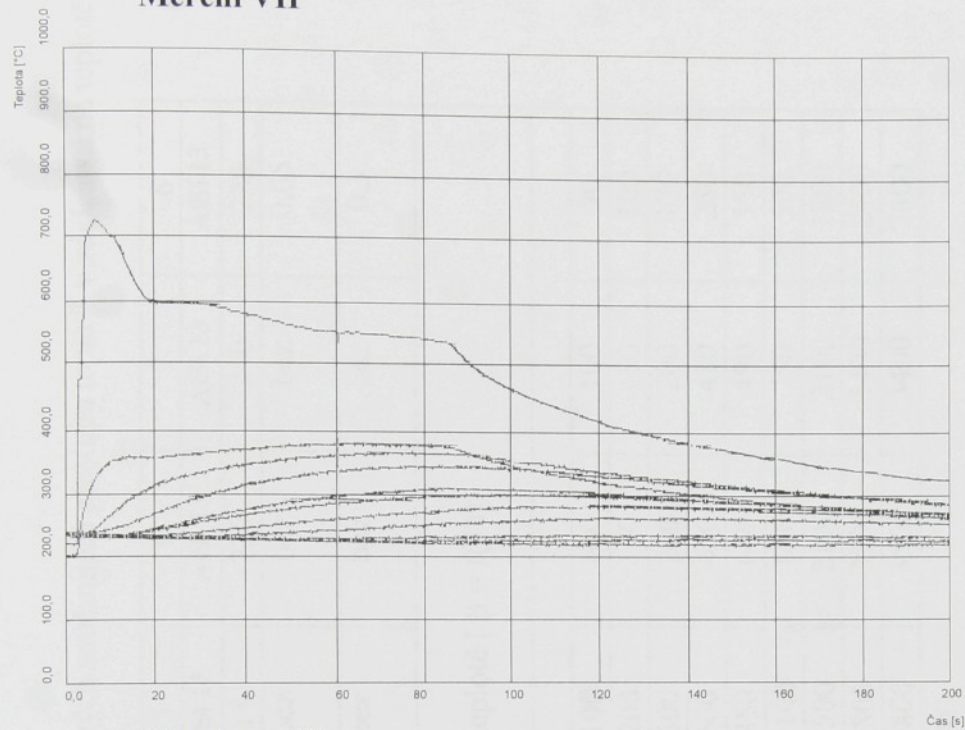
Ostatní potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin nutné pro simulaci byly převzaty z databanky programu SIMTEC, a z tabulky uvedené v příloze č.10.

Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

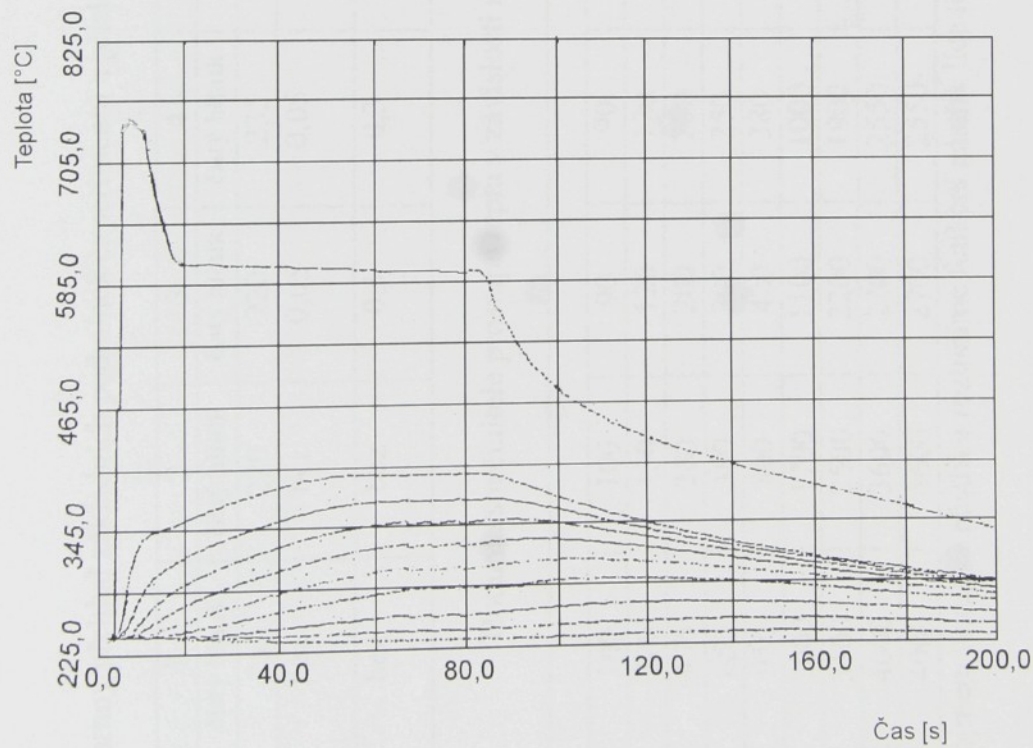
Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla β [W.m ⁻² . K ⁻¹]
20	90
100	100
200	180
300	250
400	320
500	500
600	900
700	1100
800	1100

V tabulce 8 – 7 a 8 – 8 je uveden celkový přehled hodnot součinitelů prostupu tepla v závislosti na teplotě. Na obr. 8.8 a 8.9 jsou pro přehlednost uvedeny tyto závislosti v grafické podobě.

Měření VII



Simulace VII



Tabulka č. 8 – 7 Souhrnný přehled základních podmínek experimentů a příslušných součinitelů přestupu tepla β v závislosti na teplotě

Měření číslo:	1	2	3	4	5	6	7	8
Odlévaný materiál	čistý hliník	čistý hliník	čistý hliník	čistý hliník	AlSi 13	AlSi 13	AlSi 13	AlSi 13
Teplota kokily [°C]	25	220	220	235	18	230	240	225
Tloušťka základ. nástřiku [mm]	bez	bez	0,05	0,05	bez	bez	bez	0,05
Tloušťka *) nástřiku [mm]	bez	bez	0,3	0,3	bez	bez	bez	0,3
Hodnota součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotě [$\beta = f(T)$]								
Teplota [°C]								
20	100	100	90	90	100	100	100	90
100	200	150	120	120	200	150	150	100
200	450	260	200	200	300	200	200	170
300	650	380	300	250	600	450	410	280
400	950	800	420	380	850	640	490	350
500	2000	1700	1100	1000	1100	800	750	500
600	3100	2500	2200	1900	2500	2100	2100	1800
700	4000	3600	2700	2550	3800	3500	3400	2400
800	4000	3600	2700	2550	3800	3500	3400	2400

Poznámka: *) Pod pojmem tloušťka nástřiku rozumíme funkční nástřik líce formy

Tabulka 8 – 7 (pokračování)

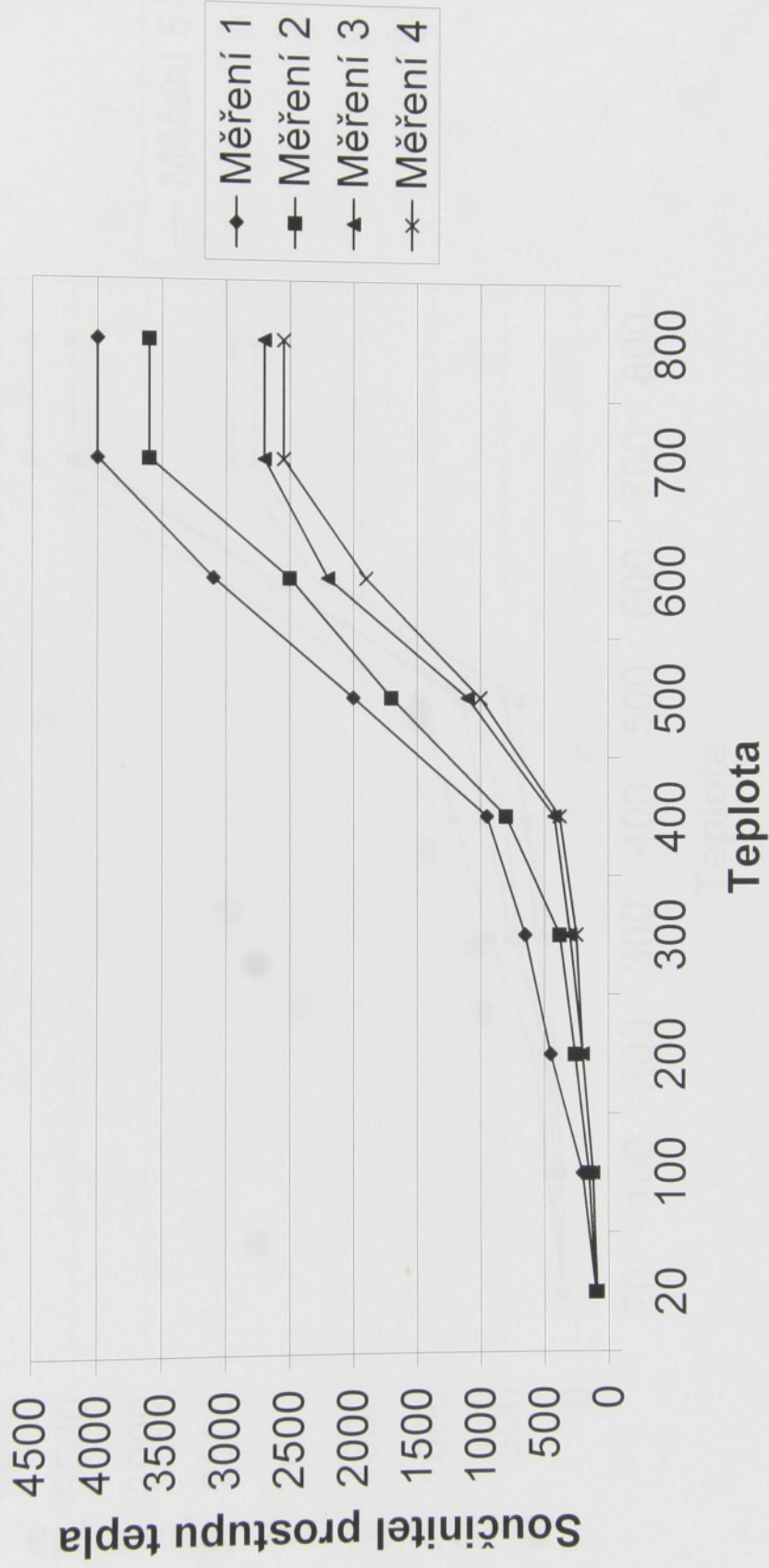
Podmínky experimentů při odlévání vybraných slévárenských slitin do litinové kokily 400 x 300 x 200 mm										
Měření číslo:	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Odléváný materiál	AlSi 13	čistý zinek	čistý zinek	čistý zinek	čistý zinek	čisté olovo	čisté olovo	čisté olovo	čisté olovo	
Teplota kokily [°C]	240	25	240	215	225	18	120	115	120	
Tloušťka zákl. nástř. [mm]	0,05	bez	bez	0,05	0,05	bez	bez	0,05	0,05	
Tloušťka *) nástřiku [mm]	0,3	bez	bez	0,3	0,3	bez	bez	0,3	0,3	
Hodnota součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotě [$\beta = f(T)$]										
Teplota [°C]										
20	90	70	70	60	50	60	50	50	50	
100	100	100	100	100	100	90	80	70	70	
200	150	200	180	200	150	190	170	130	120	
300	200	300	200	250	200	600	550	450	400	
400	350	1000	900	900	750	2000	1850	1500	1400	
500	400	4000	3100	2500	1950	3100	2700	2500	2300	
600	1700	6000	4800	3800	3400	4500	3600	2900	2780	
700	2250	6000	4800	3900	3600	4500	3800	3000	2800	
800	2250	6000	4800	3900	3600	4500	3800	3000	2800	

Tabulka č. 8 – 8 Přehled základních podmínek experimentů a součinitelů přestupu tepla β v závislosti na teplotě pro jednotlivé podmínky experimentů při odlévání AlSi10MgMn do ocelové kokily (ČSN 19 552)

Podmínky experimentů při odlévání hliníkové slitiny (AlSi10MgMn) do ocelové kokily 220 x 220 x 220 [mm]							
Měření č.	I	II	III	IV	V	VI	VII
Odlévaný materiál	AlSi10MgMn	AlSi10MgMn	AlSi10MgMn	AlSi10MgMn	AlSi10MgMn	AlSi10MgMn	AlSi10MgMn
Teplota kokily [°C]	250	210	195	190	200	235	230
Tloušťka základního nástřiku kokily [mm]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,2	0,4
Tloušťka nástřiku [mm] *)	0,2	0,4	0,8	1,2	2,2	bez	bez
Hodnota součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotě [$\beta = f(T)$] [W.m ⁻² .K ⁻¹]							
Teplota [°C]							
20	70	50	50	50	20	90	90
100	100	90	80	50	30	120	100
200	200	150	100	60	50	200	180
300	350	250	150	80	60	300	250
400	550	440	200	160	70	380	320
500	950	870	280	190	110	900	500
600	2500	1500	850	220	130	1900	900
700	2800	1900	990	480	200	2600	1100
800	2800	1900	990	480	200	2600	1100

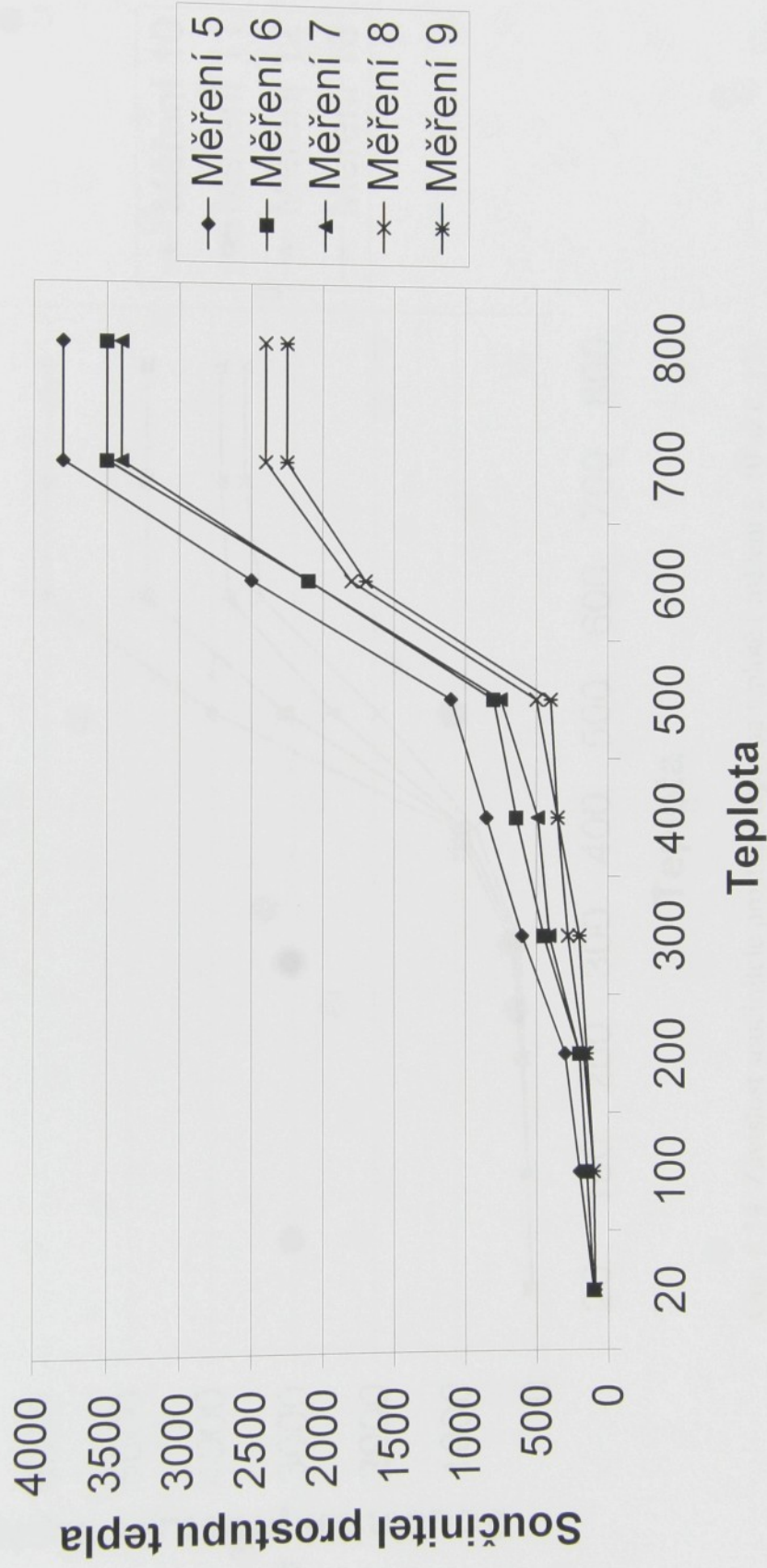
Poznámka: *) Pod pojmem tloušťka nástřiku rozumíme funkční nástřik lince formy

Součinitel prostupu tepla pro čistý hliník



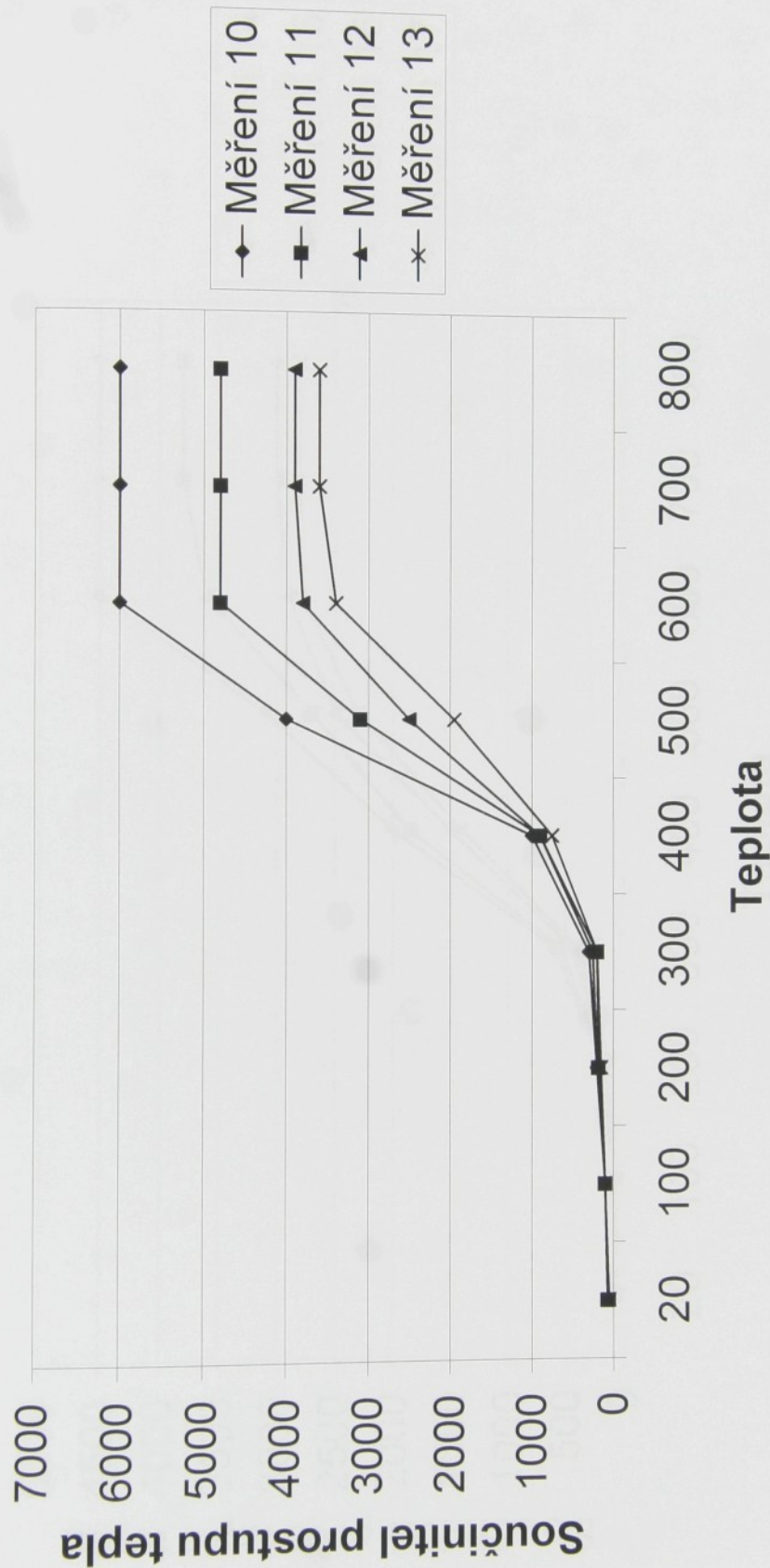
Obr. 8.12 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (měření č. 1 až č. 4)

Součinitel prostupu tepla pro AlSi13



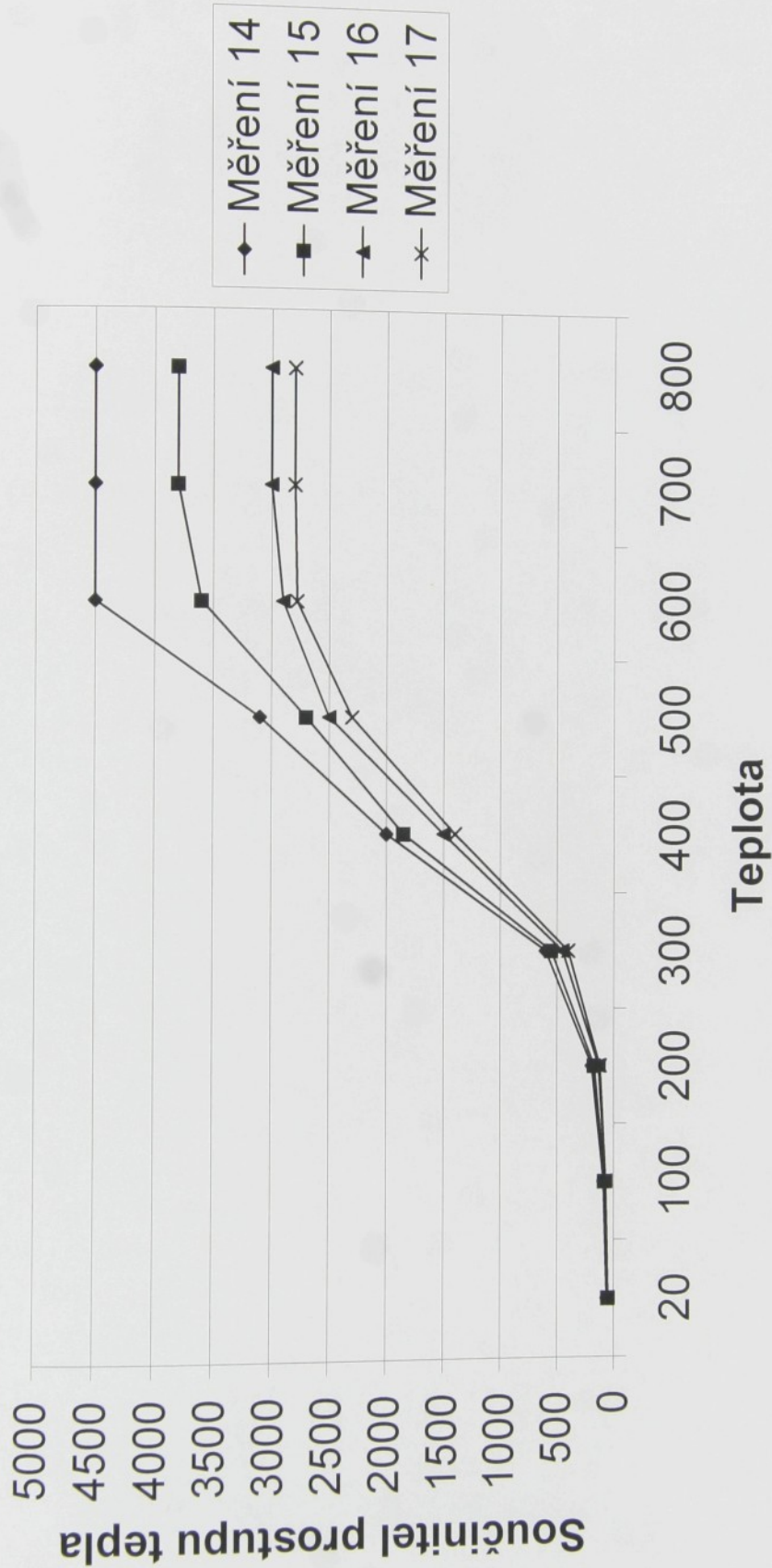
Obr. 8.13 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (měření č. 5 až č. 9)

Součinitel prostupu tepla pro čistý zinek



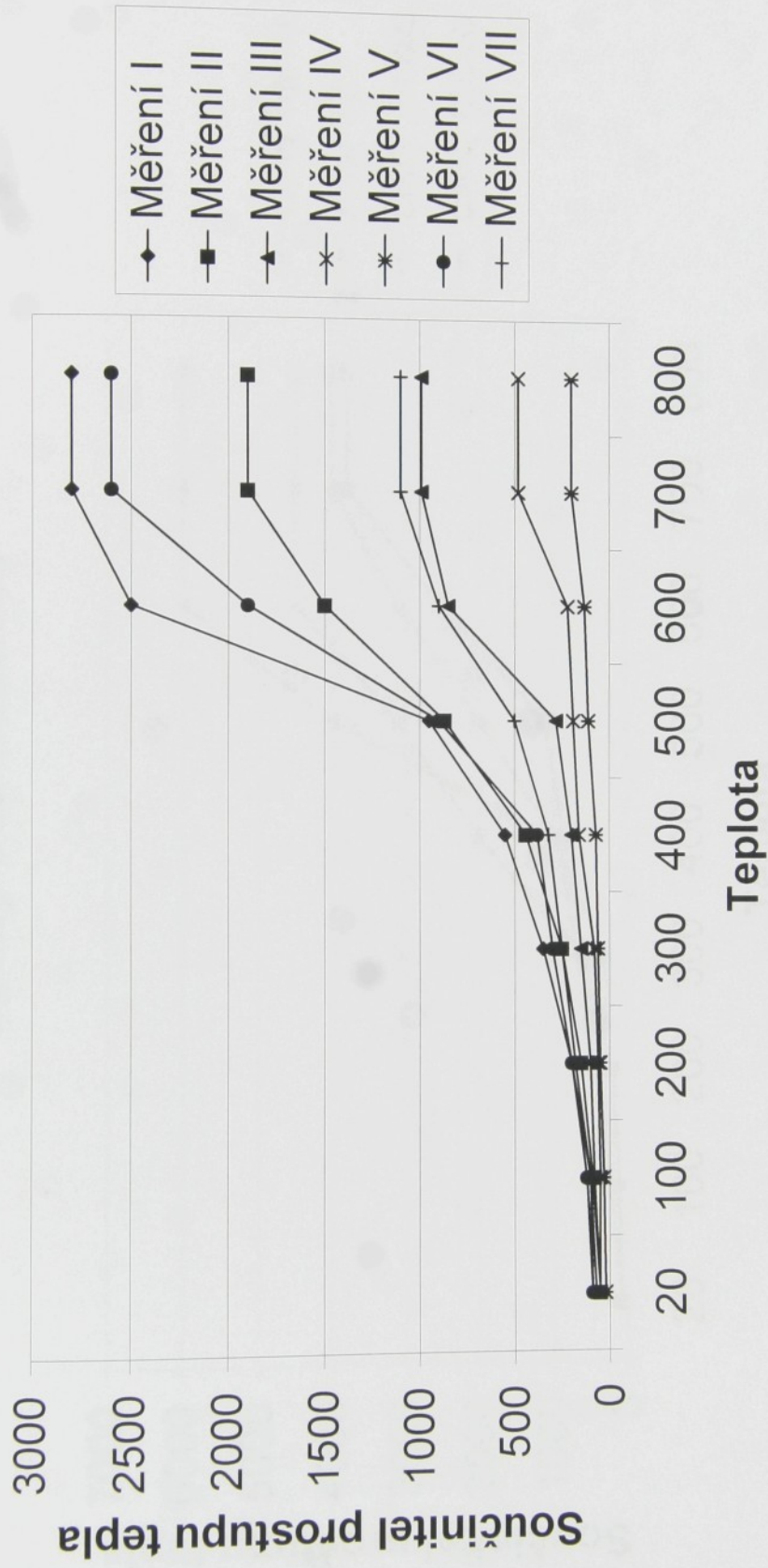
Obr. 8.14 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (měření č. 10 až č. 13)

Součinitel prostupu tepla pro čisté olovo



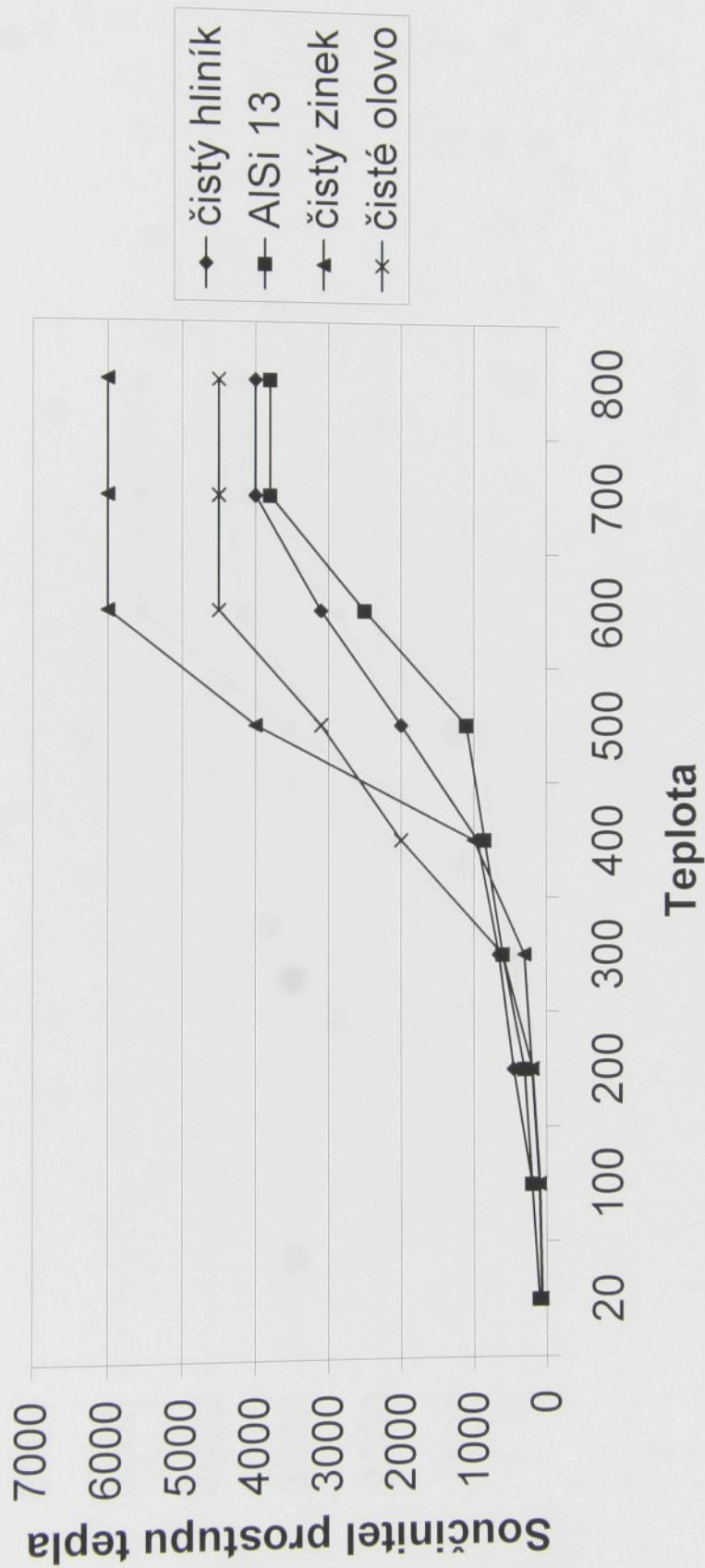
Obr. 8.15 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (měření č. 14 až č. 17)

Součinitel prostupu tepla pro AlSi10MgMn



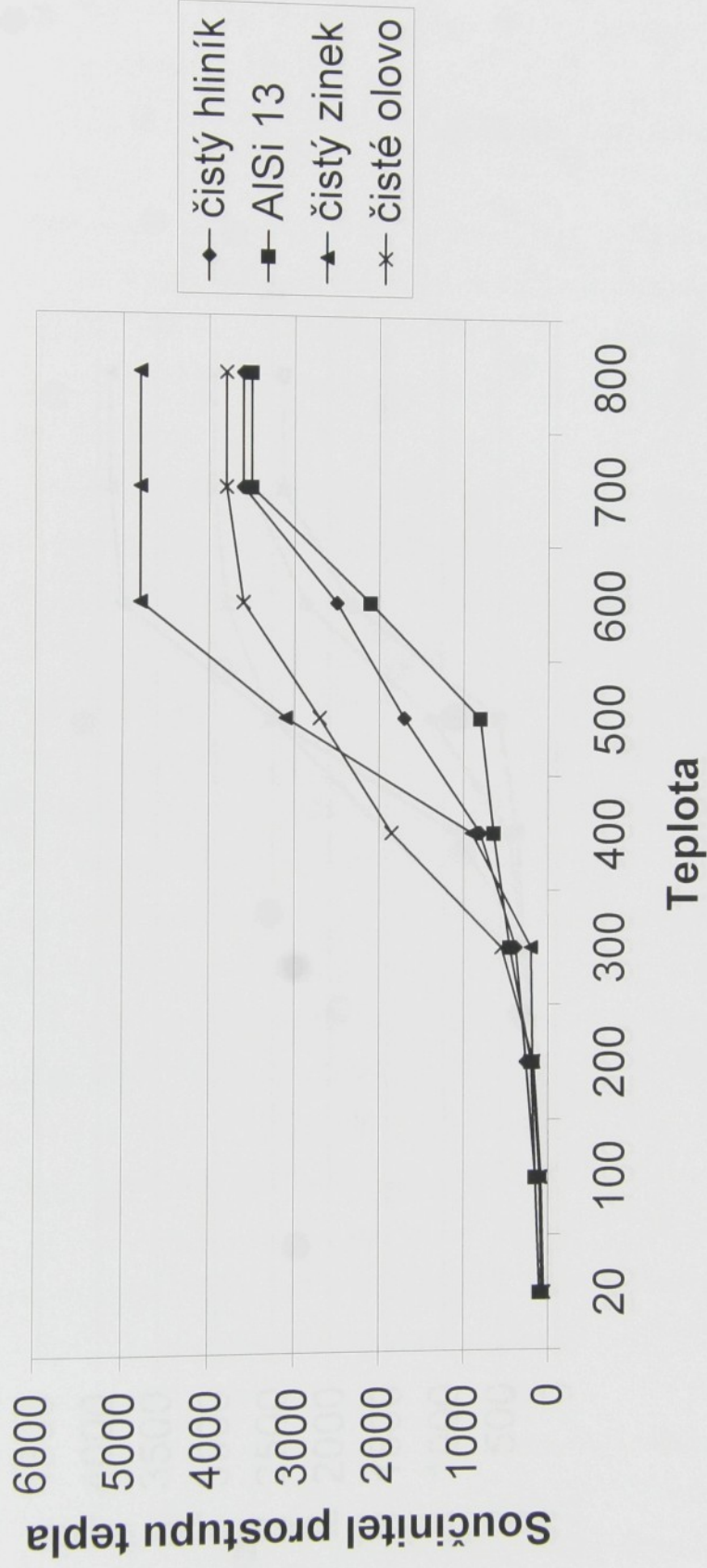
Obr. 8.16 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (měření č. I až č. VII)

Součinitel protupu tepla při lití bez do studené kokily bez nástřiku



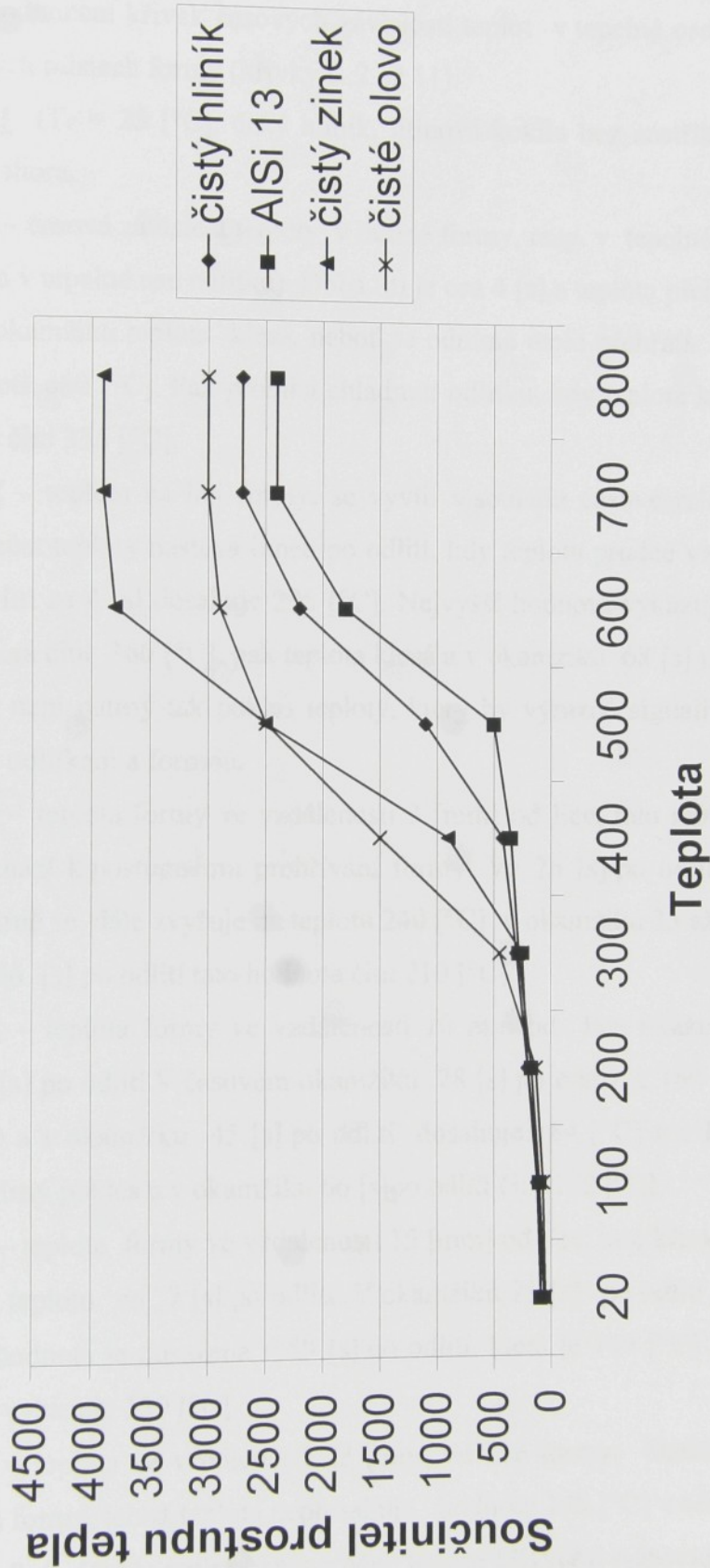
Obr. 8.17 Závislost součinitele protupu tepla na teplotě (studená kokila bez nástřiku)

Součinitel prostupu tepla do přehřáté kokily bez nástřiku



Obr. 8.18 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (přehřátá kokila bez nástřiku)

Součinitel prostupu tepla pro odlévání do předeheřáté kokily s nástříkem



Obr. 8.19 Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě (předeheřátá kokila s nástříkem)

8.8. Vyhodnocení naměřených a simulovaných výsledků

Vyhodnocení křivek časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku (křivky č. 1) a v jednotlivých místech formy (křivky č. 2 až 11).

Měření č. 1 ($T_F = 25$ [°C], čistý hliník, litinová kokila bez nástřiku) hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – časová závislost teploty v dutině formy, resp. v tepelné ose tuhnoucího odlitku (dále teplota v tepelné ose odlitku). Doba lití je cca 4 [s] a teplota přehřátí taveny je 720 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, neboť se odnímá teplo přehřátí. Tuhnutí odlitku trvá 14 [s], při teplotě 660 [°C]. Pak probíhá chladnutí odlitku, kdy teplota klesá a v 66 [s] po odlití jeho teplota činí 335 [°C].

Křivka č. 2 – teplota na lici formy, se vyvíjí v souladu časové relace tuhnutí a chladnutí odlitku. Nárůst teploty nastává ihned po odlití, kdy teplota prudce vzrůstá; z teploty 25 [°C] od počátku lití za 4 [s] dosahuje 295 [°C]. Nejvyšší hodnotu vykazuje teplota líce ve 22 [s] po odlití, která činí 360 [°C], pak teplota klesá a v okamžiku 68 [s] po odlití je 231 [°C]. Na křivce však není patrný tak pokles teploty, který by výrazně signalizoval vznik vzduchové vrstvy mezi odlitkem a formou.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce; tato teplota vzrůstá za 2 [s] po odlití a dochází k postupnému prohřívání formy. Ve 26 [s] po odlití teplota dosahuje 238 [°C] a nepatrně se dále zvyšuje na teplotu 240 [°C] v okamžiku 33 až 37 [s] po odlití, pak se snižuje a v 66 [s] po odlití tato hodnota činí 210 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy za 5 [s] po odlití. V časovém okamžiku 28 [s] po odlití je 160 [°C]. Dále teplota ještě mírně roste a v okamžiku 45 [s] po odlití dosahuje 184 [°C] a s dalším rostoucím časem následuje mírný pokles a v okamžiku 66 [s] po odlití činí 172 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce; tato křivka znázorňuje postupně se zvyšující teplotu od 7 [s] po odlití. V okamžiku 21 [s] po odlití teplota činí 80 [°C] a maximální hodnota je dosažena v 59 [s] po odlití, která je 149 [°C] a pak mírně klesá a 66 [s] po odlití vykazuje 139 [°C].

Křivka č. 6 – teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy; ukazuje postupné prohřívání tohoto místa formy, jehož teplota nepřesahuje hodnotu 140 [°C] v 66 [s] po odlití.

Křivka č. 7, 8, 9, 10, 11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době

tuhnutí a chladnutí odlitku. Teploty v místech formy, které znázorňují křivky č. 3, 4, 5 dosahují svá maxima až v době chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 1

Křivka č.1 – teplota v tepelné ose odlitku – doba lití je cca 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 720 [°C], doba tuhnutí je 12 [s] při teplotě 660 [°C], pak následuje poměrně rychlý pokles teploty. Teplota v 67 [s] po odlití činí na 320 [°C].

Křivka č.2 – teplota líce formy, nárůst teploty je ihned po odlití. V časovém okamžiku 4 [s] po odlití je teplota 300 [°C], pak dochází k mírnému poklesu teploty cca o 5 [°C] (to je pravděpodobně v důsledku vlivu vzniklé plynové vrstvy), pak následuje postupný vzrůst teploty na maximální hodnotu cca 380 [°C] v 17 [s] po odlití. Pak následuje rychlejší pokles teploty a ve 30 [s] po odlití je tato teplota 295 [°C], pak následuje pozvolný pokles teploty až na 240 [°C] v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat ihned po odlití. Nejdříve prudce a pak pozvolněji. Maximální hodnota teploty je dosažena ve 27 [s] po odlití a činí 310 [°C]. Pak následuje postupný pokles až na hodnotu 221 [°C], která je v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat za 3 [s] po odlití, maximální teplotu 230 [°C] dosahuje v 25 [s] po odlití, pak následuje postupný pokles teploty na hodnotu 210 [°C] v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota ve vzdálenosti 15 [mm] od líce začíná vzrůstat od 3 [s] po odlití maximální teplotu 180 [°C] dosahuje ve 30 [s] po odlití, pak teplota již jen mírně klesá na teplotu 175 [°C], která se ustavuje v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy začíná vzrůstat od 4 [s] do 28 [s] po odlití strměji na teplotu 160 [°C] a dále ještě nepatrně teplota roste na 170 [°C]. V 67 [s] po odlití teplota vykazuje teplotu 163 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkem odpovídají naměřeným průběhům, čím však charakterizují vzdálenější místo od líce, tím teploty vykazují větší shodu

Měření č. 2 ($T_F = 200$ °C, čistý hliník, litinová kokila bez nástřiku) hodnocení křivek na každém obrázku je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny činí 720 [°C], doba lití 3 [s]. Počáteční teplota dutiny formy činí 185 [°C], což potvrzuje vliv sálavého tepla

z předeřáté formy. Tuhnutí odlitku je 16 [s], při teplotě 660 [°C], pak následuje postupné ochlazování odlitku. V 67 [s] po odlití jeho teplota činí 440 [°C].

Křivka č. 2 – teplota na lici formy začíná vzrůstat poměrně intenzivně ihned po odlití a ve 3 [s] po odlití teplota je již 320 [°C]. V 11 [s] po odlití je na křivce patrný mírný pokles teploty, který činí 435 [°C], proti předchozí teplotě 450 [°C]. Maximální teplota je v tomto místě dosažena až v 25 [s] po odlití a činí 471 [°C]. Pak následuje postupné snižování teploty a v 67 [s] po odlití tato teplota činí 360 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce se začíná zvyšovat cca od 4 [s] po odlití a teplota činí 240 [°C]. Maximální teplota 400 [°C] v tomto místě formy je ve 32 [s] po odlití. Pak následuje velmi pozvolné ochlazování a v 67 [s] po odlití teplota vykazuje hodnotu 360 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat od 7 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 354 [°C] je dosažena v 51 [s] po odlití. Dále teplota jen velmi nepatrně klesá a v 67 [s] po odlití dosahuje 345 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce se začíná zvyšovat v 8 [s] po odlití a svého maxima 318 [°C] dosahuje v 50 [s] po odlití. Dále se teplota až do 67 [s] po odlití téměř nemění.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce se začíná zvyšovat od 10 [s] po odlití. Maximální teplotu 305 [°C] dosahuje v 63 [s] po odlití. Tato teplota je stejná i v 67 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 2

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku – doba lití je cca 3 [s] teplota přehřátí taveniny je 750 [°C], doba tuhnutí je 16 [s] při teplotě 660 [°C], pak následuje zprvu poměrně rychlý, pak pozvolnější pokles teploty, která v 67 [s] po odlití vykazuje 470 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, nárůst teploty je téměř ihned po odlití, do teploty 350 [°C] je poměrně strmý nárůst. Tato teplota se ustavuje za 1 [s] po odlití. Pak je nárůst teploty pozvolnější a v 7 [s] je mírný pokles teploty na hodnotu 345 [°C]. Pak následuje vzrůst v cca 9 [s] po odlití na hodnotu 470 [°C]. Dále je opět nevýrazný pokles teploty. Pak následuje ve 26 [s] po odlití opět nárůst teploty na hodnotu 470 [°C]. Pak nastává postupný pokles teploty na hodnotu 370 [°C], která se ustavuje v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat také téměř po odlití, průběh křivky v základních rysech kopíruje křivku předchozí. Maximální hodnota teploty 460 [°C] je dosažena ve 24 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty. V 67 [s] po odlití teplota činí 363 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat od 3,5 [s] po odlití. Její průběh je pozvolnější než u předchozích dvou křivek. Maximální hodnota teploty je dosažena ve 26 [s] po odlití a činí 399 [°C]. Pak následuje velmi pozvolný pokles teploty. V 67 [s] po odlití teplota vykazuje 350 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce začíná vzrůstat od 3,5 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty je dosažena ve 29 [s] po odlití a činí 370 [°C]. Pak následuje pozvolný pokles teploty. V 67 [s] po odlití je teplota 340 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 4 [s] po odlití. V 67 [s] po odlití je teplota 310 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce ukazují větší shodu.

Měření č. 3 ($T_F = 220$ °C, čistý hliník, litinová kokila s nástřiky líce (tloušťkou základního nástřiku 0,05 [mm] a tloušťka funkčního nástřiku 0,3 [mm])); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny činí 735 [°C], doba lití je 4 [s]. Počáteční teplota dutiny formy činí 168 [°C], což potvrzuje vliv sálavého tepla z předeřáté formy. Tuhnutí odlitku je 21 [s] při teplotě 660 [°C], pak následuje postupné ochlazování odlitku. V 66 [s] po odlití jeho teplota činí 470 [°C].

Křivka č. 2 – teplota na lici formy začíná růst téměř ihned po odlití. Od 3 [s] po odlití prudce vzrůstá a činí 340 [°C]. Pak roste pozvolněji a maximální hodnoty 440 [°C] dosahuje ve 37 [s] po odlití, to je okamžik kdy je dokončeno tuhnutí odlitku. Pak následuje neustálý pokles teploty a v 66 [s] po odlití teplota činí 375 [°C]. Na křivce není patrný výrazný pokles, který by signalizoval vznik vzduchové mezery.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce se zvyšuje od počátku odlévání taveniny. Zprvu je nárůst teploty téměř lineární, až do teploty 320 °C, která se ustavuje v 15 [s] po odlití. Dále teplota roste na maximální hodnotu 391 [°C], kterou dosahuje ve 41 [s] po odlití. Pak se teplota mírně snižuje a v 66 [s] po odlití dosahuje 360 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vykazuje pozvolnější průběh nárůstu teploty ke kterému dochází od 6 [s] po odlití. Ve 32 [s] po odlití je již teplota 320 [°C].

°C] a to vlivem blízkosti líce formy. Pak se teplota mírně zvyšuje a maxima 345 [°C] dosahuje ve 44 [s] po odlití. Pak následuje jen mírné klesání teploty, která v okamžiku 65 [s] po odlití činí 329 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vykazuje pozvolný vzrůst od 10 [s] po odlití a maxima dosahuje v 59 [s] po odlití, kdy se teplota dále udržuje téměř na konstantní hodnotě 305 [°C] až do 66 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 10 [s] po odlití a maximální teploty 300 [°C] dosahuje až v 66 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 3

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je cca 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 738 [°C], doba tuhnutí je 21 [s] při teplotě 660 [°C], pak následuje chladnutí odlitku, teplota klesá. V 67 [s] po odlití je teplota 443 [°C].

Křivka č. 2 - teplota líce formy vzrůstá téměř ihned po odlití. Nejprve je nárůst strmější a dále méně strmý. Od 13 [s] po odlití nastává krátká časová prodleva (3,5 s) při teplotě 310 [°C], pak následuje nárůst na maximální hodnotu 430 [°C], která je v 30 [s] po odlití. Dále je mírný pokles teploty. V časovém okamžiku 67 [s] po odlití je teplota 345 [°C].

Křivka č. 3 – teplota ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy roste ihned po odlití. Nejdříve strměji do 3 [s] po odlití, pak pozvolněji. Maximální teplota 405 [°C] je dosažena ve 32 [s] po odlití, pak následuje pozvolný pokles. V 67 [s] po odlití teplota činí 340 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat ve 3 [s] po odlití pomalu. Maximální teplota 360 [°C] je dosažena ve 36 [s] po odlití, pak následuje pozvolný pokles. V 67 [s] po odlití je teplota 338 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce začíná vzrůstat od 3 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty je dosaženo ve 40 [s] po odlití, teplota činí 340 [°C] a pak klesá. V 67 [s] po odlití je teplota 332 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 4 [s] po odlití, maximální teplota 315 [°C] je dosažena v 67 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 4 ($T_F = 235\text{ }^{\circ}\text{C}$, čistý hliník, kokila s nástřiky líce (tloušťkou základního nástřiku 0,05 [mm] a tloušťka funkčního nástřiku 0,3 [mm]) hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, čas lití je 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 745 [$^{\circ}\text{C}$], doba tuhnutí odlitku činí 24 [s], pak následuje pomalé ochlazování odlitku (cca 4,5 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$]) a v okamžiku 67 [s] po odlití činí tato teplota 475 [$^{\circ}\text{C}$].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, tato teplota roste ihned po odlití. Zprvu je její průběh velmi strmý (s rychlostí 30 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$]) a od 4 [s] po odlití je průběh pozvolnější. Maximální teplota 475 [$^{\circ}\text{C}$] je dosažena ve 32 [s] po odlití. Pak následuje již jen pozvolné klesání teploty a v 67 [s] po odlití je 390 [$^{\circ}\text{C}$].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná růst od 5 [s] od počátku lití. Ve 40 [s] po odlití se teplota ustavuje na maximální hodnotě 390 [$^{\circ}\text{C}$]. Pak následuje již jen pozvolné klesání teploty a v časovém okamžiku 67 [s] po odlití teplota činí 395 [$^{\circ}\text{C}$].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce má velmi pozvolný vzrůstající průběh od 8 [s] po odlití. Maximální hodnota 350 [$^{\circ}\text{C}$] je dosažena ve 46 [s] po odlití. Pak následuje velmi pozvolný pokles na hodnotu 340 [$^{\circ}\text{C}$], která se ustavuje v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vykazuje pozvolný vzrůst od 10 [s] po odlití a maxima dosahuje v 59 [s] po odlití, kdy se teplota dále udržuje téměř na konstantní hodnotě 322 [$^{\circ}\text{C}$] až do 67 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 13 [s] po odlití a maximální teplotu 300 [$^{\circ}\text{C}$] dosahuje v 63 [s] po odlití. Tato teplota se dále téměř nemění do okamžiku 67 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 4

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je téměř 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 745 [$^{\circ}\text{C}$], doba tuhnutí odlitku je 19 [s] při teplotě 660 [$^{\circ}\text{C}$], pak následuje ochlazování až na teplotu 475 [$^{\circ}\text{C}$], která je v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 2 – teplota líce formy, vzrůstá ihned po odlití, nejdříve velmi strmě na teplotu 325 [$^{\circ}\text{C}$], která se ustavuje ve 2 [s] po odlití. Pak teplota roste pozvolněji. Na křivce se objevují dvě velmi nepatrné teplotní prodlevy. První je v časovém okamžiku 4 [s] po odlití při teplotě 387 [$^{\circ}\text{C}$] a druhá v 18 [s] po odlití (trvá asi 2 s) a je při teplotě 430 [$^{\circ}\text{C}$].

Maximální hodnota teploty 450 [°C] se ustavuje ve 26 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty, která v 67 [s] po odlití vykazuje 363 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce, roste ihned po odlití. Od 3 [s] po odlití strměji, pak pozvolněji. Maximální teplota 425 [°C] je dosažena ve 27 [s] po odlití, pak následuje pozvolný pokles teploty, v 67 [s] po odlití je 357 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce se zvyšuje od 5 [s] po odlití, maximální hodnotu 385 [°C] dosahuje ve 32 [s] po odlití. Pak následuje pomalé ochlazování na hodnotu 265 [°C], která je v 67 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy začíná vzrůstat v 6 [s] po odlití. Maximální teplota 356 [°C] je dosažena v 39 [s] po odlití. Dále teplota klesá a v 67 [s] po odlití teplota činí 258 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat v 7 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 332 [°C] je dosažena v 56 [s] po odlití. Dále teplota klesá a v 67 [s] po odlití teplota činí 326 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu..

Měření č. 5 ($T_F = 18$ [°C], AlSi13, litinová kokila bez nástřiku); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku. Doba lití činí 6 [s], teplota přehřátí taveniny je 670 [°C]. Doba tuhnutí odlitku je 33 [s] při teplotě 560 [°C], která odpovídá teplotě krystalizace modifikovaného siluminu. Pak teplota klesá, (probíhá chladnutí odlitku) a ve 49 [s] po odlití teplota činí 480 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, vzrůstá ihned po odlití. V 5 [s] po odlití je teplota konstantní a vykazuje 225 [°C] po dobu 2 [s], pak vzrůstá. V 18 [s] po odlití dosahuje teplota maximální hodnotu, která je 280 [°C], (to je téměř v polovině doby tuhnutí odlitku). Pak následuje pozvolný pokles teploty na hodnotu 260 [°C], po dobu 7 sekund. Ten lze vysvětlit změnou na lici formy, pravděpodobně vznikem vzduchové vrstvy mezi odlitkem a formou. Pak následuje opět vzestup teploty a ve 40 [s] po odlití je 280 [°C] a pak následuje patrný pokles teploty. V 49 [s] po odlití je teplota 245 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 mm od líce se zvyšuje ihned od 2 [s] po odlití. V 8 [s] po odlití vykazuje teplota prodlevu na hodnotě 97 [°C], která trvá až do 16 [s]. Pak následuje zvýšení teploty na maximální hodnotu 169 [°C], které je ve 43 [s] po odlití. Teplota s hodnotou 149 [°C] se udržuje až do 49 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat od 6 [s] po odlití, teplota se postupně zvyšuje a v 16 [s] po odlití vykazuje mírnou teplotní prodlevu 70 [°C] po dobu 1 [s]. Ve 49 [s] po odlití je teplota již 115 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] začíná vzrůstat od 11 [s] po odlití. Maximální hodnotu teploty 80 [°C] dosahuje ve 49 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá od 17 [s] po odlití, její průběh je velmi pozvolný, ve 49 [s] po odlití dosahuje maximum 65 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 5

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba odlévání činí téměř 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 660 [°C], tuhnutí trvá 30 [s] při teplotě 566 [°C], pak následuje pokles teploty. Tento pokles není tak typicky exponenciální jako při ochlazování čistého hliníku. V 52 [s] po odlití teplota činí 380 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat ihned po odlití, nejdříve velmi prudce, pak pozvolněji. V časovém okamžiku 4 [s] po odlití je na křivce vytvořena nepatrná teplotní prodleva (180 °C), která má souvislost se simulací vytvářené vzduchové vrstvy. Maximální hodnota teplota 265 [°C] je ve 37 [s] po odlití. V 52 [s] po odlití teplota činí 235 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce roste téměř ihned po odlití a její růst je poměrně odstupňovaný. Zlom na křivce nastává ve 2,5 [s] po odlití při teplotě 141 [°C]. Pak následuje pomalejší nárůst teploty a ve 41 [s] po odlití teplota činí 240 [°C]. Pak následuje mírný pokles a v 52 [s] po odlití teplota činí 227 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat za 2,5 [s] po odlití. Její nárůst je pozvolný maximální teplota 200 [°C] je dosažena v 52 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy začíná vzrůstat pozvolna od 3 [s] po odlití. Tento vzrůst teploty je až do 52 [s] po odlití, kdy teplota činí 180 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat za 5 [s] po odlití, maximální hodnotu 150 [°C] dosahuje v 52 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým vzhledem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Hodnoty teplot u tohoto simulačního výpočtu celkově vykazují menší schodu výsledků s výsledky experimentálně naměřenými.

Měření č. 6 ($T_F = 230$ [°C], AlSi13, litinová kokila bez nástřiku); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, postupně vzrůstá, teplota přehřátí taveniny je 655 [°C] doba lití činí cca 3 [s] (jako ve všech ostatních případech pak následuje pokles, kdy je odváděno teplo přehřátí). Tuhnutí odlitku trvá 34 [s] a probíhá při teplotě 577 [°C], i když byla provedena modifikace. Pak následuje ochlazování na teplotu 515 [°C], která je v 57 [s] po odlití.

Křivka č. 2 – teplota líce formy, prudce vzrůstá ihned po odlití. V počátku tuhnutí dlouho setrvává na teplotě 405 [°C] po dobu 16 [s], pak pomalu vzrůstá. Maximální teplota 435 [°C] se ustavuje v 39 [s] po odlití. Pak teplota zvolna klesá a v 57 [s] po odlití dosahuje hodnotu 406 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce, začíná vzrůstat asi 2,5 [s] po odlití a v 8 [s] po odlití činí již 320 [°C], pak následuje velmi pozvolné zvyšování teploty až do 57 [s] po odlití, v tomto okamžiku teplota činí 380 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá od 8 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 320 [°C] je dosažena v 49 [s] po odlití. Ta zůstává až do 57 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce roste pozvolně od 13 [s] po odlití a maximální hodnota 280 [°C] je dosažena ve 39 [s] po odlití a udržuje se až do 57 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce roste od 16 [s] po odlití pozvolna. Maximální hodnotu 300 [°C] dosahuje v 45 [s] po odlití. Teplota s touto hodnotou přetrvává až do 57 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 6

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je cca 3 [s], teplota přehřátí taveniny 665 [°C], doba tuhnutí odlitku je 39 [s] při teplotě 560 [°C], pak následuje pozvolné ochlazování. V 57 [s] po odlití teplota vykazuje 492 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste ihned po odlití, nejdříve prudce až na teplotu 390 [°C], která je dosažena téměř ve 3 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty a v 6 [s] po odlití teplota činí 375 [°C] a současně se ukazuje její mírná prodleva. Pak následuje postupné

zvyšování teploty na výrazné maximum 430 [°C] ve 27 [s] po odlití. Tento průběh teploty na lici odpovídá poloviční době tuhnutí odlitku. Pak následuje pozvolné ochlazování. V 57 [s] po odlití teplota činí 390 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce roste ihned po odlití, v 6 [s] po odlití dosahuje teplota hodnotu 345 [°C], pak následuje pomalejší nárůst až na maximální hodnotu 425 [°C], pak teplota pozvolna klesá a v 57 [s] po odlití je 386 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce roste cca za 3 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 375 [°C] je dosažena ve 39 [s] po odlití a pak následuje velmi pozvolný pokles teploty, která v 57 [s] po odlití činí 145 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy roste od 6,5 [s] po odlití. Maximální hodnotu 353 [°C] dosahuje ve 45 [s] po odlití, pak následuje pokles teploty na hodnotu 340 [°C] v 57 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy roste od 6,5 [s] po odlití. Hodnota maximální teploty 335 [°C] je dosažena v 57 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 7 ($T_F = 240$ [°C], AlSi13, litinová kokila bez nástřiku); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teploty v tepelné ose odlitku, doba plnění formy je 4 [s]. Teplota přehřátí taveniny je 680 [°C], tuhnutí odlitku trvá 43 [s] a probíhá při teplotě 566 [°C]. Pak následuje pokles teploty a ve 117 [s] po odlití teplota činí 440 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá ihned po odlití a následuje prodleva na teplotě 435 [°C], která trvá 13 [s], pak teplota velmi pozvolně roste a v 25 [s] po odlití dosahuje 445 [°C]. Pak se na křivce vyskytuje několik teplotních výchylek a od 68 [s] po odlití teplota jen klesá a v 116 [s] dosahuje 465 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce, roste od 8 [s] po odlití. Ve 24 [s] po odlití teplota vykazuje prodlevu na hodnotě 325 [°C] po dobu 26 [s], pak ještě mírně vzrůstá a maximum dosahuje v 85 [s] po odlití, kdy teplota činí 365 [°C] a tuto teplotu si udržuje téměř až do 116 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá od 8 [s], vykazuje také prodlevu na hodnotě 318 [°C] od 36 do 51 [s] po odlití. Pak teplota vzrůstá a v 89 [s] po odlití dosahuje maximální teplotu 350 [°C], která se do 116 [s] po odlití téměř nemění.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vzrůstá v 10 [s] po odlití. Maximální hodnotu 330 [°C] dosahuje v 116 [s] po odlití a tato teplota se dále nemění.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce roste od 12 [s] po odlití velmi pozvolně a ve 104 [s] po odlití dosahuje 320 [°C]. Tato teplota setrvává až do 116 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 7

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 680 [°C], doba tuhnutí je 54 [s], při teplotě 570 [°C]. Pak následuje pomalé chladnutí odlitku, resp. teplota klesá a ve 116 [s] po odlití dosahuje hodnoty 403 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat od počátku odlévání. Teplota líce roste velmi prudce a v 7 [s] po odlití činí 475 [°C], pak následuje postupný nepatrný vzrůst teploty na hodnotu 485 [°C] ve 27 [s] po odlití, pak následuje velmi pomalý pokles a v 57 [s] teplota činí 480 [°C]. Pak následuje výraznější pokles teploty až na hodnotu 397 [°C] ve 116 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy vzrůstá ihned po odlití. Nárůst teploty je nejdříve poměrně velký a to až do 12 [s] po odlití, kdy je hodnota teploty 413 [°C], pak následuje pomalejší nárůst až na hodnotu 455 [°C], která se ustavuje v 56 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty a ve 116 [s] po odlití hodnota činí 386 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy vzrůstá 2 [s] po odlití. Maximální teplota 385 [°C] je dosažena v 79 [s] po odlití. Pak následuje pomalé ochlazování, ve 116 [s] po odlití je teplota 364 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá ve 3 [s] po odlití velmi pomalu a svým průběhem se blíží a současně kopíruje průběh předchozí křivky. Maximální hodnota teploty je dosažena v 82 [s] po odlití a činí 365 [°C], pak následuje ochlazování. Ve 116 [s] po odlití teplota vykazuje hodnotu 359 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce, teplota vzrůstá za 3,5 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty je dosažena v 84 [s] po odlití a činí 359 [°C], pak následuje pomalé ochlazování. Ve 116 [s] po odlití je teplota 353 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 8 ($T_F = 225$ [°C], AlSi13, litinová kokila základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,3 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba plnění formy je asi 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 695 [°C], tuhnutí odlitku trvá 50 [s] při teplotě 577 [°C]. Pak následuje pokles teploty v důsledku chladnutí odlitku. V časovém okamžiku 97 [s] po odlití je teplota 490 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste ihned po odlití a zprvu velmi prudce, za 2,5 [s] po odlití vykazuje teplotu 320 [°C]. Pak pokračuje pozvolnější růst a ve 28 [s] po odlití teplota činí 390 [°C]. Pak následuje pokles teploty, který je způsoben vytvořením vzduchové vrstvy mezi odlitkem a formou. Dále teplota vykazuje pokles a udržuje se na prodlevě trvajícím cca 14 [s] a následné ustálení na teplotě 365 [°C] v 66 [s] po odlití s následným mírným poklesem na hodnotu 340 [°C]. V 97 [s] po odlití je hodnota teploty 335 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce roste od 3 [s] po odlití. Ve 46 [s] po odlití dosahuje 365 [°C], pak teplota klesá a v 97 [s] po odlití teplota činí 340 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] roste za 6 [s] po odlití celkem pomalu, maximum dosahuje od 50 do 79 [s] po odlití a teplota činí 324 [°C]. Pak následuje nepatrný pokles na hodnotu 320 [°C], která se vytváří v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy, teplota roste za 9 [s] po odlití velmi pozvolně. Maximální hodnota teploty 310 [°C] je dosažena v 59 [s] po odlití. Tato teplota se až do 97 [s] po odlití téměř nemění.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá od 14 [s] po odlití. Maximální hodnotu dosahuje v 76 [s] po odlití a teplota činí 300 [°C]. Tato teplota zůstává až do 97 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Z křivek č. 2 a 3 je patrné, že ve 37 [s] po odlití dochází k poklesu teploty na křivce 2 na hodnotu 360 [°C] a pokračuje další mírný pokles na hodnotu 350 [°C]. Naopak teplota na křivce č. 3 vzrůstá na a v tomto časovém okamžiku dosahuje maximální hodnotu 360 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 8

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je téměř 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 665 [°C]. Doba tuhnutí odlitku je 59 [s] při teplotě 560 [°C]. Pak následuje chladnutí odlitku a v 97 [s] po odlití teplota činí 480 [°C].

Křivka č.2 – teplota líce formy, nárůst teploty je ihned po odlití a má poměrně strmý charakter. V čase 0,5 [s] po odlití je teplota 340 [°C], pak nepatrně vzrůstá na 345 [°C] a následně nepatrně klesá. Tento výrazný pokles charakterizuje vznik plynové vrstvy mezi ztuhlou povrchovou vrstvou odlitku a lícem formy. Pak následuje poměrně pomalý růst teploty až na maximální hodnotu, která je 388 [°C] v 50 [s] po odlití. Pak následuje mírný pokles teploty na hodnotu 375 [°C], která se udržuje po dobu 18 [s]. Pak následuje pomalý pokles teploty na hodnotu 338 [°C], která je v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy začíná růst za 0,5 [s] po odlití. Růst je strmější až na teplotu cca 300 [°C], která je ve 3 [s] po odlití. Pak následuje pozvolný růst teploty na 370 [°C] a následuje malý pokles na hodnotu 368 [°C] na této hodnotě teplota setrvává po dobu cca 20 [s]. Následný pokles teploty je velmi mírný až na hodnotu 334 [°C], která je v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat od 3 [s] po odlití, její průběh je zprvu nepatrně strmější a pak velmi mírný. Maximální teplota 350 [°C] je dosažena v 64 [s] po odlití. Pak tato teplota mírně klesá až na hodnotu 325 [°C], která je v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce začíná vzrůstat ve 3 [s] po odlití, pokles je mírnější než u předchozí křivky, maximální hodnotu teploty 338 [°C] dosahuje v 75 [s] po odlití. Pak následuje velmi pomalý pokles. V časovém okamžiku 97 [s] po odlití teplota vykazuje 322 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá za 4 [s] po odlití v celém časové rozsahu celkem mírným způsobem. V 77 [s] po odlití dosahuje teplota maximální hodnotu 319 [°C], pak následuje pokles na hodnotu 317 [°C], která je v 97 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 9 ($T_F = 240$ [°C], AlSi13, litinová kokila základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,3 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 655 [°C]. Doba plnění formy je 4 [s]. Po následném odvodu tepla přehřátí následuje tuhnutí odlitku, které trvá 54 [s] při teplotě cca 560 [°C]. Následuje pozvolné ochlazování odlitku. V časovém okamžiku 96 [s] po odlití teplota činí 473 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat téměř ihned po odlití. Vzrůst teploty je poměrně strmý, v 16 [s] po odlití dosahuje teplota 400 [°C], pak následuje jen nepatrný

vzrůst teploty v 26 [s] po odlití na maximální hodnotu 407 [°C]. Po této maximální teplotě je nepatrný pokles na hodnotu 390 [°C], to je pravděpodobně v důsledku vzniku plynové vrstvy mezi odlitkem a formou. Po opětném nepatrném vzrůstu teploty, která v 56 [s] po odlití činí 405 [°C] následuje v časovém okamžiku 96 [s] po odlití pokles teploty na hodnotu 380 [°C].

Křivka č. 3 - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá za 3 [s] po odlití poměrně prudce. V 16 [s] po odlití teplota již činí 320 [°C] a teplota dále vzrůstá až na maximální hodnotu 358 [°C] a na této teplotě se udržuje od 40 až do 71 [s] po odlití, pak tato teplota mírně klesá a v 96 [s] po odlití tato teplota vykazuje 340 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá za 6 [s] po odlití. Vzrůst je pozvolný a ve 12 [s] po odlití je teplota 279 [°C]. Maximální teplota 329 [°C] je v 32 [s] po odlití a trvá až do 85 [s]. Pak následuje její mírný pokles a v 96 [s] po odlití tato teplota činí 324 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vzrůstá od 8 [s] po odlití. V 16 [s] po odlití je teplota 253 [°C]. Maximální hodnotu 290 [°C] dosahuje ve 46 [s] po odlití, která se nemění do 96 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá velmi pozvolna od 11 [s] po odlití. Od 70 [s] po odlití dosahuje maximum 280 [°C], které se dále nemění.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 9

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 650 [°C]. Doba tuhnutí je 54 [s] při teplotě 560 [°C]. Pak následuje pozvolné ochlazování a v časovém okamžiku 97 [s] po odlití teplota činí 482 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat ihned po odlití, nejdříve strměji do teploty 332 [°C], která se ustavuje v 0,5 [s] po odlití. Pak následuje mírnější růst s následným poklesem, představuje simulaci vzniku vzduchové mezery. Pak teplota roste pozvolna až na hodnotu 399 [°C], pak následuje mírný pokles na hodnotu 393 [°C]. Tato teplota setrvává po dobu 12 [s]. Pak následuje pomalý pokles teploty. V 97 [s] po odlití tato teplota činí 332 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat 0,5 [s] po odlití do hodnoty 322 [°C], která je ve 3,5 [s] po odlití. Pak následuje mírnější růst až na teplotu 395

[°C], pak následuje nepatrný pokles na 390 [°C]. Tato teplota se udržuje po dobu 11 [s] dále je mírný pokles teploty na hodnotu 330 [°C], která se ustavuje v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat za 4 [s] po odlití, zprvu je růst strmější až na teplotu 277 [°C], která je v 6.5 [s] po odlití. Pak následuje mírnější růst teploty až na hodnotu 363 [°C], která se ustavuje ve 48 [s] po odlití. Tato teplota setrvává po dobu 18 [s]. Pak následuje pomalý pokles na hodnotu 328 [°C], která je v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy začíná vzrůstat od 4 [s] po odlití. Maximální teplota 334 [°C] je dosažena v 57 [s] po odlití a setrvává po dobu 9 [s]. Pak následuje pokles na hodnotu 325 [°C], která je v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 4,5 [s] po odlití. Nárůst teploty je mírný v celém časovém rozsahu. Maximum teploty 345 [°C] je v 59 [s] po odlití. Tato teplota setrvává na této hodnotě po dobu cca 10 [s], pak následuje pokles na hodnotu 322 [°C], která se ustavuje v 97 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 10 ($T_F = 25$ [°C], čistý zinek; litinová kokila bez nástríku), hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 445 [°C]. Doba lití je 4 [s] při teplotě 420 [°C], pak následuje odvod tepla přehřátí taveniny na teplotu krystalizace 419 [°C], která trvá 27 [s]. Dále pokračuje poměrně intenzivní odvod tepla při tuhnutí odlitku. V 56 [s] po odlití je teplota chladnoucího odlitku 285 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy prudce vzrůstá ihned po odlití. Již v 7 [s] po odlití je teplota 175 [°C] a dále jen nepatrně vzrůstá cca o 1 až 3 [°C]. Tato teplota se udržuje až do 30 [s] po odlití, pak teplota mírně klesá a v 56 [s] po odlití činí 165 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá za 3 [s] po odlití. Zpočátku je nárůst teploty dosti strmý a v 15 [s] po odlití je tato teplota již 120 [°C] a postupně dále vzrůstá. Maximální hodnotu 171 [°C] dosahuje ve 36 [s] po odlití. Pak teplota pomalu klesá a v 56 [s] po odlití je 153 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce pozvolně roste od 7 [s] po odlití a ve 29 [s] je již 120 [°C]. Pak následuje ještě další nárůst na teplotu 129 [°C] a tato teplota se již nemění a je i v 56 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce pozvolně roste od 9 [s] po odlití a ve 23 [s] po odlití dosahuje již 60 [°C]. Pak teplota ještě roste na maximální hodnotu 94 [°C], kterou dosahuje ve 41 [s] po odlití. Tato teplota se již do 56 [s] po odlití nemění.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 10 [s] po odlití. Ve 23 [s] po odlití je teplota 56 [°C], maximální hodnotu 89 [°C] dosahuje ve 43 [s] po odlití, dále se teplota již nemění.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 10

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 2 [s] teplota přehřátí taveniny je 455 [°C], doba tuhnutí je 23 [s]. Teplota krystalizace je 404 [°C]. Ochlazování je pomalé až na teplotu 300 [°C], která se ustavuje v 58 [s] po odlití.

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste ihned po odlití. Nejdříve strmě až do teploty 120 [°C], která je téměř v okamžiku odlití. Pak následuje mírné zvýšení na teplotu 130 [°C] a následný pokles na teplotu 115 [°C], který signalizuje simulaci vzniku vzduchové vrstvy mezi odlitkem a formou. Pak následuje pozvolný růst teploty až na hodnotu 175 [°C], která se ustavuje ve 34 [s] po odlití. Pak teplota klesá až na hodnotu 125 [°C], která je v 58 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce roste téměř ihned po odlití. Do okamžiku 4 [s] po odlití na teplotu 90 [°C] celkem rychle, pak je nárůst teploty mírnější. Maximální teplota 170 [°C] je dosažena ve 36 [s] po odlití. Pak následuje pomalý pokles na hodnotu 120 [°C], která je v 68 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] po odlití roste za 3 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 130 [°C] je dosažena ve 40 [s] po odlití. Pak následuje pomalý pokles na hodnotu 117 [°C], která je v 68 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy se zvyšuje za 3 [s] po odlití, maximální teplota 120 [°C] je dosažena ve 46 [s] po odlití. V 58 [s] po odlití je teplota 115 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy se zvyšuje velmi mírně za 3,5 [s] po odlití. Maximální teplota 95 [°C] je dosažena v 68 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 11 ($T_F = 240$ [°C], čistý zinek; litinová kokila bez nástřiku), hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 435 [°C]. Doba lití je 3 [s] Doba tuhnutí odlitku je 39 [s] při teplotě 419 [°C]. Po ztuhnutí teplota odlitku klesá v souladu s jeho chladnutím v teplé kokile, které je pozvolnější, než u kokily studené. V 97 [s] po odlití je teplota chladnoucího odlitku 345 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy se zvyšuje ihned po odlití. V 7 [s] po odlití již činí 341 [°C]. Tato teplota nevykazuje žádný pokles, který by charakterizoval vznik vzduchové vrstvy mezi odlitkem a formou. V 17 [s] po odlití dosahuje maximum 345 [°C] až do 51 [s] po odlití, kdy tato teplota začíná klesat až na hodnotu 320 [°C] v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná růst za 3 [s] po odlití. V 11 [s] po odlití dosahuje teplota hodnotu 300 [°C], pak následuje další zvyšování na maximální hodnotu 335 [°C], kterou dosahuje v 47 [s] po odlití. Na této hodnotě teplota setrvává až do 63 [s] po odlití a pak pozvolna klesá. V 97 [s] po odlití teplota činí 320 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá pozvolně od 6 [s] po odlití a ve 32 [s] po odlití dosahuje 300 [°C], pak teplota mírně roste. V 57 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu 307 [°C], dále teplota velmi nepatrně klesá až do 97 [s] po odlití. V tomto časovém okamžiku je teplota 305 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy se zvyšuje od 10 [s] po odlití. V 60 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu 285 [°C] a na této teplotě setrvává až do okamžiku 97 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce roste od 13 [s] po odlití a maxima 265 [°C] dosahuje v 63 [s] po odlití, které je až do 97 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 11

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je téměř 3 [s], teplota přehřátí taveniny je 463 [°C]. Tuhnutí odlitku probíhá po dobu 40 [s] při teplotě 415 [°C]. Pak následuje chladnutí s převládajícím pozvolným snižováním teploty. V okamžiku 97 [s] po ztuhnutí je teplota 346 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy se zvyšuje ihned po odlití poměrně strmě, kdy je dosažena teplota 304 [°C] za jednu sekundu po odlití. Pak následuje nepatrné zvýšení teploty na

hodnotu 325 [°C] (2,5 s po odlití) a následný pokles teploty líce opět ukazuje na simulační výpočet vzniku vzduchové mezery. Pak následuje zvýšení teploty na maximální hodnotu, která je 350 [°C] ve 23 [s] po odlití, pak následuje mírný pokles s následným vzrůstem teploty, která není vyšší než 350 [°C]. Od okamžiku ztuhnutí odlitku dochází ke snižování teploty v tomto místě slévárenské formy. V 97 [s] po odlití se teplota ustavuje na hodnotě 296 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce se zvyšuje ihned po odlití. Do okamžiku 3 [s] po odlití se zvyšuje strměji a v tomto čase dosahuje 291 [°C]. Pak je nárůst teploty mírnější. Pro 23 [s] po odlití je teplota 338 [°C], pak následuje nepatrný pokles. Maximální hodnota teploty 345 [°C] je dosažena ve 40 [s] po odlití. Pak následuje postupný mírný pokles teploty až na hodnotu 294 [°C], která se ustavuje v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce se zvyšuje za 3 [s] po odlití celkem pozvolně. Maximální hodnota teploty 325 [°C] je dosažena v okamžiku chladnutí odlitku, tj. 48 [s] po odlití. Pak následuje postupné mírné snižování teploty, která v časovém okamžiku 97 [s] po odlití činí 291 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce se zvyšuje od 3 [s] po odlití její průběh je mírnější než v případě předchozí křivky. Maximální teplota 312 [°C] je dosažena v 53 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty na hodnotu 288 [°C], která se ustavuje v 97 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy se velmi pomalu zvyšuje, maximální hodnotu 305 [°C] dosahuje v 56 [s] po odlití. Pak následuje velmi pomalý pokles teploty. V 97 [s] po odlití teplota dosahuje 285 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 12 ($T_F = 215$ [°C], čistý zinek; litinová kokila základní nástřik 0,05 [mm] a funkční nástřik 0,3 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 440 [°C], odlévání je 3 [s]. Tuhnutí odlitku trvá 53 [s] při teplotě 419 [°C]. Pak následuje chladnutí odlitku a teplota v 97 [s] po odlití dosahuje hodnotu 315 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy poměrně prudce vzrůstá ihned po odlití. V 7 [s] po odlití vykazuje již hodnotu 300 [°C] a pak následuje pozvolný nárůst a v 17 [s] po odlití na hodnotu 315 [°C]. Pak teplota velmi mírně klesá a od 72 [s] po odlití výrazněji a v 97 [s] po odlití vykazuje teplotu 280 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce se začíná zvyšovat od 5 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití již vykazuje teplotu 275 [°C] a její maximum je 282 [°C] v 57 [s] od počátku lití. Pak teplota klesá a v 97 [s] po odlití dosahuje hodnotu 280 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy vzrůstá od 7 [s] po odlití a v 17 [s] po odlití dosahuje 250 [°C]. Pak teplota roste na maximální hodnotu 273 [°C], kterou dosahuje v 67 [s] po odlití. Dále teplota mírně klesá a v 97 [s] po odlití je teplota vykazuje hodnotu 265 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá velmi pomalu za 12 [s] po odlití. Ve 27 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu 230 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] po odlití roste od 14 [s] po odlití a maximum 245 [°C] dosahuje v 82 [s] po odlití a teplota se dále téměř nemění.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 12

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba odlévání je 2 [s], teplota přehřátí taveniny je 460 [°C], doba tuhnutí odlitku je 48 [s] při teplotě 425 [°C]. Pak následuje pomalé ochlazování na teplotu 350 [°C], která se ustavuje v 98 [s] po odlití.

Křivka č. 2 – teplota líce formy, se zvyšuje ihned po odlití a v 1,5 [s] po odlití dosahuje hodnotu 280 [°C]. Pak následuje pokles, simulace vzniku vzduchové vrstvy, a pak opět postupné zvyšování teploty. Ve 29 [s] po odlití je teplota 316 [°C], pak nepatrně klesá a opět se mírně zvyšuje na hodnotu 316 [°C], která se ustavuje v 51 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty na hodnotu 280 [°C], která je v 98 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy se zvyšuje téměř ihned po odlití, nejdříve rychleji. Ve 2,5 [s] po odlití dosahuje 258 [°C]. Dále je postupné zvyšování teploty na hodnotu 308 [°C] v 55 [s] po odlití a také v okamžiku, kdy začíná odlitek chladnout. Pak následuje pokles teploty na hodnotu 278 [°C], která je v 98 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy se zvyšuje za 2,5 [s] po odlití. Její nárůst je plynulý. Maximální hodnota teploty 296 [°C] je docílena v 60 [s] po odlití. Pak následuje postupný pokles teploty na hodnotu 275 [°C], která odpovídá 98 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy se zvyšuje od 3 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 292 [°C] je dosažena v 60 [s] po odlití, pak následuje pomalý pokles na teplotu 270 [°C], která odpovídá 98 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy roste od 4 [s] po odlití. Maximální teplota 276 [°C] je dosažena v 68 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty na hodnotu 264 [°C], která se ustálí v 98 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 13 ($T_F = 225$ [°C], čistý zinek; litinová kokila základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,3 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 450 [°C], doba lití 3 [s]. Při následném ochlazování se projevilo poměrně velké podchlazení 44 [°C]. Doba tuhnutí odlitku je 59 [s] při teplotě 423 [°C]. Pak následuje pozvolné ochlazování ($1,3$ °C.s⁻¹) a v časovém okamžiku 97 [s] po odlití teplota činí 341 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy se zvyšuje ihned po odlití. V 8 [s] po odlití dosahuje 313 [°C], maximální teplota je 335 [°C] ve 14 až do 20 [s] po odlití. Pak teplota nepatrně klesá do 67 [s] po odlití v 97 [s] po odlití dosahuje 297 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá za 5 [s] po odlití a dosahuje 247 [°C] v 17 [s] po odlití má již 281 [°C] s následným nepatrným růstem, který dosahuje 295 [°C] a dále pomalým ochlazováním. Teplota v 97 [s] po odlití dosahuje 289 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá od 7 [s] po odlití v 17 [s] po odlití dosahuje 250 [°C]. Maximální teplota 283 [°C] je dosažena v 63 [s], která trvá do 74 [s] po odlití. Pak teplota pozvolně klesá a v 97 [s] po odlití dosahuje hodnotu 275 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá od 8 [s] po odlití a v 17 [s] po odlití dosahuje teplotu 280 [°C]. Maximální hodnotu dosahuje v 64 až 82 [s] po odlití a teploty činí 266 [°C] a v 97 [s] 260 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy začíná růst od 10 [s] po odlití. Maxima dosahuje v 97 [s] po odlití a teplota činí 260 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy v uvedené době tuhnutí a chladnutí odlitku.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 13

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 2,5 [s], teplota přehřátí taveniny je 460 [°C], tuhnutí odlitku probíhá po dobu 50 [s] při teplotě 420 [°C]. Při ochlazování odlitku teplota klesá pomalu, v 97,5 [s] po odlití má teplota hodnotu 354 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá ihned po odlití, nejdříve rychle až do okamžiku 1,5 [s] po odlití, kdy teplota dosahuje 260 [°C], pak teplota výrazně klesá a dosahuje 255 [°C] (v okamžiku 2,5 [s] po odlití), při následném zvyšování docílí v 57 [s] po odlití maximální hodnotu 416 [°C]. Pak následuje postupné snižování teploty a v 97,5 [s] po odlití teplota činí 260 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy se zvyšuje ihned po odlití, nejdříve se zvyšuje rychleji. Ve 4 [s] po odlití teplota dosahuje 256 [°C], pak pomalu roste a v 61 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu 280 [°C], opět následně klesá a v 97,5 [s] po odlití dosahuje 259 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy se začíná zvyšovat od 3 [s] po odlití, její růst je pozvolný a maximální hodnota teploty 288 [°C] je dosažena v 63 [s] po odlití. Dále následuje pomalý pokles teploty. V 97,5 [s] po odlití teplota činí 258 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá od 3,5 [s] po odlití. Maximální hodnota teploty 278 [°C] je dosaženo v 66 [s] po odlití, pak následuje její pomalé snižování. V 97,5 [s] po odlití dosahuje 257 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy se zvyšuje od 4 [s] po odlití. Maximální hodnotu 274 [°C] dosahuje v 68 [s] po odlití, pak následuje její postupné snižování. V 97,5 [s] po odlití teplota vykazuje 255 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 14 ($T_F = 18$ [°C], čisté olovo; litinová kokila bez nástriků); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 350 [°C], doba lití je 4 [s]. Při následném poklesu teploty probíhá krystalizace při teplotě 327 [°C], doba tuhnutí odlitku je 8 [s]. Pak následuje pokles teploty vlivem chladnutí odlitku. Teplota ve 36 [s] po odlití vykazuje 202 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste téměř současně s počátkem odlévání a její nárůst je poměrně strmý. Na křivce není patrný typický pokles v důsledku vzniku plynové vrstvy mezi odlitkem a formou. Maximální teplota dosahuje 125 [°C] v 11 [s] po odlití a trvá do 16

sekundy po odlití. Od 20 [s] po odlití teplota začíná klesat a ve 36 [s] po odlití dosahuje 102 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy začíná vzrůstat velmi pozvolně od 4 [s] po odlití. Ve 49 [s] po odlití je teplota 49 [°C]. Maximální teplota 64 [°C] je v 31 [s] po odlití, pak následuje její nepatrný pokles a v 36 [s] po odlití je 60 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy vzrůstá od 6 [s] po odlití velmi pomalu, maxima dosahuje v 31 [s] po odlití a teplota vykazuje 52 [°C] a v 36 [s] je teplota 55 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá od 7 [s] po odlití velmi pozvolna a ve 36 [s] po odlití dosahuje 50 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy vzrůstá od 10 [s] po odlití a maxima dosahuje ve 36 [s] po odlití, kdy teplota činí 37 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 35 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 14

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 2 [s], teplota přehřátí taveniny činí 368 [°C], doba tuhnutí odlitku je 10 [s] při teplotě 323 [°C]. Pak následuje snižování teploty, která ve 38 [s] po odlití dosahuje 210 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná růst již v průběhu odlévání, v okamžiku 0,5 [s] po odlití činí již 135 [°C], pak teplota vzrůstá. Pak následuje pokles na hodnotu 112 [°C], která se ustavuje v 6,5 [s] po odlití. Pak teplota mírně stoupá na 116 [°C], což nevýrazným způsobem signalizuje vznik plynové vrstvy mezi odlitkem a formou. Dále se teplota zvyšuje a ve 13 [s] po odlití dosahuje teplota 118 [°C], pak teplota klesá a ve 38 [s] po odlití dosahuje teplotu 82 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy začíná růst již v průběhu odlévání a to nejdříve strměji. Ve 3 [s] po odlití dosahuje teplotu 99 [°C], pak teplota nevýrazně roste a posléze až mírně klesá a následně roste a v časovém okamžiku 13,5 [s] po odlití je teplota 107 [°C]. Pak teplota klesá a v 38 [s] po odlití je 81 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] se zvyšuje od 3 [s] po odlití, nejdříve strměji a v 6 [s] po odlití je 55 [°C], pak teplota roste a maximální hodnotu 85 [°C] dosahuje v 17 [s] po odlití, pak teplota klesá a ve 38 [s] po odlití dosahuje teplotu 77 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy se začíná zvyšovat od 3 [s] po odlití postupným způsobem. Maximální hodnota teploty 75 [°C] je dosažena v 21 [s] po odlití. Pak následuje mírný pokles teploty a ve 38 [s] po odlití teplota činí 71 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy začíná vzrůstat od 4 [s] po odlití velmi pozvolným způsobem, maximální teplota 67 [°C] je dosažena ve 38 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 15 ($T_F = 120$ [°C], čisté olovo; litinová kokila bez nástřiků); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, teplota přehřátí taveniny je 335 [°C], doba odlévání 3 [s]. Mírný pokles teploty není doprovázen podchlazením a ihned následuje tuhnutí odlitku, které trvá 17 [s]. Teplota tuhnutí je 327 [°C]. Pak následuje celkem rychlý pokles teploty a v 37 [s] po odlití teplota činí 207 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy se zvyšuje ihned po odlití s prudkým růstem. Za 2 [s] po odlití je již teplota 178 [°C], maximum 190 [°C] dosahuje v 11 [s] po odlití, pak následuje pokles a ve 47 [s] po odlití je 170 [°C]. Na křivce není patrný výrazný pokles, který je typický pro vznik vzduchové vrstvy mezi odlitkem a formou.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy se zvyšuje za 2 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití teplota dosahuje 160 [°C] a pak teplota jen mírně roste na hodnotu 168 [°C], kterou udržuje až do 47 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy pozvolna roste za 4 [s] po odlití a ve 12 [s] po odlití dosahuje 140 [°C]. Maximální hodnotu 160 [°C] dosahuje ve 27 [s] po odlití a to si udržuje až do 47 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy roste od 8 [s] po odlití. Maximální teplota 151 [°C] se ustavuje od 37 [s] po odlití a přetrvává až do 47 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy se začíná velmi mírně zvyšovat od 11 [s] po odlití. Maximální hodnotu 140 [°C] dosahuje ve 47 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 140 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 15

Křivka č. 1 – tepelná osa odlitku, doba lití je 1,5 [s], teplota přehřátí taveniny je 365 [°C]. Tuhnutí odlitku probíhá 14 [s] při teplotě. Pak následuje zprvu rychlejší pokles teploty a pak pozvolnější. V 48,5 [s] po odlití teplota činí 217 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy se zvyšuje ihned v průběhu odlévání. Nejdříve je nárůst strmější až do teploty 188 [°C], která je ve 3 [s] po odlití. Pak následuje nepatrný pokles na teplotu 184 [°C] a pomalé zvyšování teploty na hodnotu 204 [°C], která se ustavuje v 9 [s] po odlití, pak následuje pokles teploty a následné mírné zvýšení s postupným pomalým snižováním teploty. Ve 48,5 [s] po odlití teplota činí 163 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy vzrůstá dříve než za 0,5 [s] po odlití, nejdříve strmým způsobem. Ve 3 [s] po odlití teplota činí 173 [°C], pak následuje postupné zvyšování teploty na hodnotu 192 [°C], která je v 10 [s] po odlití. Pak následuje nepatrné snížení s následným zvýšením teploty na 192 [°C] v 21 [s] po odlití a pak teplota opět pozvolně klesá na hodnotu 160 [°C], která se vytváří v 58,5 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy začíná vzrůstat od 3 [s] po odlití, maximální hodnotu 176 [°C] dosahuje ve 23 [s] po odlití, pak následuje velmi pomalé ochlazování na teplotu 158 [°C], která je v 48,5 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá též od 3 [s] po odlití velmi pomalým, postupným způsobem na 163 [°C], která je v 27 [s] po odlití. Pak následuje velmi pomalé ochlazování a v 38,5 [s] po odlití teplota činí 158 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy se zvyšuje od 4,5 [s] po odlití velmi pozvolným způsobem. Hodnota teploty 158 [°C] je dosažena v 37 [s] po odlití, pak následuje pomalý pokles až na hodnotu 155 [°C], která se ustavuje v 38,5 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 16 ($T_F = 115$ [°C], čisté olovo; litinová kokila - základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,3 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, přehřátí taveniny je 341 [°C], odlévání je 3 [s]. Doba tuhnutí je 21 [s] při teplotě 327 [°C]. Pak následuje poměrně rychlé ochlazení, které v 97 [s] po odlití činí 195 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá ihned po odlití poměrně strmě. V 7 [s] po odlití je teplota 165 [°C], pak teplota pozvolna vzrůstá. Maximum 177 [°C] je ve 13 [s] po odlití. Pak teplota pomalu klesá a v 97 [s] po odlití dosahuje 145 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy roste za 3 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití dosahuje 140 [°C] s následným maximem 150 [°C], které je ve 37 [s] po odlití, pak teplota klesá a v 97 [s] po odlití je 145 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá pomalu od 6 [s] po odlití a v 16 [s] po odlití dosahuje 135 [°C] a dále velmi pomalu roste. Maxima 145 [°C] dosahuje ve 46 [s] po odlití a tato teplota trvá až do 97 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá v 11 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití tato teplota činí 130 [°C]. Teplota vzrůstá a maxima dosahuje v 70 [s], kdy je teplota 140 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá od 15 [s] po odlití velmi pozvolně a v 97 [s] po odlití dosahuje 127 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11 - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 130 [°C]. Křivka č. 8 výrazně kopíruje hodnoty předchozí křivky.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 16

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 1,5 [s], teplota přehřátí taveniny je 350 [°C], tuhnutí odlitku probíhá po dobu 17 [s] při teplotě 330 [°C]. Pak teplota klesá, zprvu intenzivněji, pak pomaleji. V 98,5 [s] po odlití teplota dosahuje 189 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá velmi strmě v průběhu odlévání, pak následuje mírnější zvyšování teploty až na hodnotu 163 [°C], která je ve 4 [s] po odlití. Pak následuje mírný pokles teploty na hodnotu 157 [°C] a následné opětné zvyšování teploty na 172 [°C], která je ve 12 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty a v 98,5 [s] po odlití teplota činí 140 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 mm od líce, vzrůstá ihned po odlití, nejprve strmě a to do 4 [s] po odlití, kdy teplota vykazuje 152 [°C], pak následuje zvyšování teploty, které ve 13 [s] po odlití činí 164 [°C]. Pak následuje nepatrné snížení na teplotu 161 [°C] s následným zvýšením teploty na hodnotu 163 [°C] a pak je pozvolné klesání teploty až do okamžiku 98,5 [s] po odlití, kdy teplota činí 139 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce se začíná zvyšovat od 4 [s] po odlití. Maximální hodnotu 158 [°C] dosahuje ve 28 [s] po odlití. Pak následuje postupné snižování teploty a v 98,5 [s] po odlití teplota činí 137 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce roste od 4 [s] po odlití, maximální hodnotu 150 [°C] dosahuje v 31 [s] po odlití. Pak následuje pomalý pokles teploty. Teplota v 98,5 [s] po odlití činí 135 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná vzrůstat od 4,5 [s] po odlití. Maximální hodnotu 154 [°C] dosahuje ve 41 [s] po odlití. Pak následuje pomalý pokles teploty. V časovém okamžiku 98,5 [s] po odlití teplota činí 132 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. 17 ($T_F = 120$ [°C], čisté olovo; litinová kokila - základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,3 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č.1 – teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny je 340 [°C], odlévání trvá 4 [s], tuhnutí probíhá po dobu 22 [s] při teplotě 327 [°C]. Pak následuje celkem velmi intenzivní chladnutí odlitku a v 96 [s] po odlití teplota činí 187 [°C].

Křivka č. 2 - teplota líce formy vzrůstá za 1 [s] po odlití a v 6 [s] po odlití činí již 160 [°C] pak dále vzrůstá a ve 26 [s] po odlití dosahuje maximum, tj. 173 [°C] a následně velmi pozvolně klesá až do 96 [s] po odlití, kdy je 154 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy roste od 5 [s] po odlití a ve 14 [s] po odlití již dosahuje 145 [°C]. Dále ještě nepatrně vzrůstá na hodnotu 150 [°C] a od 36 [s] po odlití je téměř konstantní až do 66 [s] po odlití a činí 158 [°C]. V 96 [s] po odlití je 152 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy vzrůstá od 7 [s] po odlití a v 16 [s] po odlití činí již 140 [°C] a pak nepatrně roste a svého maxima dosahuje ve 36 [s] po odlití a teplota činí 146 [°C] až do 96 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy vzrůstá od 12 [s] po odlití. V 17 [s] dosahuje 130 [°C] a od 46 [s] po odlití je teplota 147 [°C] až do 96 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy roste od 18 [s] po odlití velmi pomalu a maximum dosahuje v 75 [s] po odlití a zůstává na této hodnotě až do 96 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 130 [°C]. Jako v předchozím případě, křivka č. 8 výrazně kopíruje hodnoty předchozí křivky.

Výsledky simulačního výpočtu měření č. 17

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba odlévání činí 2 [s], teplota přehřátí taveniny je 380 [°C], doba tuhnutí je 18 [s] při teplotě 331 [°C]. Pak následuje postupný pokles teploty, nejdříve intenzivnější, pak mírnější. V 98 [s] po odlití je teplota 200 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat opět již během lití, zprvu intenzivněji až na teplotu 176 [°C], která je ve 4 [s] po odlití, pak je pozvolnější růst na hodnotu 190 [°C], která se ustavuje ve 12 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty na hodnotu 187 [°C]. Na této hodnotě teplota setrvává po dobu 6 [s] a pak následuje jen pomalé postupné zvýšení teploty o 3 [°C], pak teplota již jen klesá a v 98 [s] po odlití dosahuje hodnotu 144 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá ihned po odlití, nejdříve strměji, až do 3 [s] po odlití, kdy teplota činí 160 [°C], pak se zvyšuje pozvolněji a ve 12 [s] po odlití teplota vykazuje hodnotu 176 [°C], pak následuje pokles na teplotu 174 [°C], který se udržuje po dobu 8 [s] a pak mírně roste na hodnotu 175 [°C] a pak již klesá. V 98 [s] po odlití vykazuje teplota 141 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce formy vzrůstá za 3,5 [s] po odlití. Maximální hodnotu 165 [°C] dosahuje ve 26 [s] po odlití, pak teplota klesá. V 98 [s] po odlití je teplota 139 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy roste na maximum 160 [°C], které dosahuje ve 32 [s] po odlití. Pak následuje pomalé ochlazování na hodnotu 137 [°C], kterou dosahuje v 98 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce roste za 4 [s] po odlití velmi pozvolným způsobem. Maximální hodnota teploty 145 [°C] je dosažena ve 45 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty, v 98 [s] po odlití teplota činí 135 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. I ($T_F = 250$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila - základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,2 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny je 800 [°C]; doba lití je 3 [s] (pak následuje odvod tepla přehřátí). Dále následuje tuhnutí odlitku, které trvá 68 [s] v rozmezí teplot cca 600 až 570 [°C]. Pak je poměrně dosti intenzivní ochlazování odlitku, které v 237 [s] po odlití činí 350 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá ihned po odlití poměrně strmým způsobem . Při teplotě 390 [°C] je mírná teplotní prodleva , která trvá asi 10 [s] a pak následuje další vzrůst

teploty, který je v souladu s probíhající krystalizací daného odlitku. Tato teplota dosahuje 415 [°C]. Od 93 [s] po odlití teplota líce klesá a ve 236 [s] po odlití tato teplota dosahuje 315 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce roste od 3 [s] po odlití a v 21 [s] dosahuje 315 [°C]. Dále teplota nepatrně roste a v 93 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu 363 [°C]. Pak teplota klesá a ve 237 [s] po odlití dosahuje 315 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá od 10 [s] po odlití a dosahuje 290 [°C], pak ještě mírně roste a maximální teplotu 345 [°C] dosahuje v 96 [s] po odlití a pak teplota klesá. Ve 237 [s] po odlití tato teplota činí 312 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce roste od 12 [s] po odlití. Ve 21 [s] po odlití dosahuje teplotu 260 [°C]. Ve 48 [s] po odlití teplota činí 245 [°C] a maximum dosahuje ve 127 [s] po odlití a tato teplota činí 315 [°C]. Tato teplota pak klesá a v 237 [s] po odlití dosahuje 305 [°C].

Křivka č. 6 – teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce; její průběh je v podstatě shodný s křivkou č. 5.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde teploty jsou nižší než 300 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. I

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba odlévání trvá 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 790 [°C], tuhnutí odlitku je 66 [s] v rozmezí teplota 595 a 575 [°C], pak následuje postupný pokles teploty. Nejdříve je pokles teploty intenzivní, pak pozvolnějš. Ve 236 [s] po odlití teplota činí 350 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste ihned po odlití, nejdříve prudce. Ve 3 [s] po odlití dosahuje teplotu 362 [°C], pak následuje mírné prodlení na této teplotě po dobu 4 [s] a pak následuje postupné pomalé zvyšování na hodnotu 414 [°C]. Po následném postupném mírném snižování teploty se ustavuje v 236 [s] po odlití na hodnotě 300 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná růst ihned po odlití. V 10 [s] po odlití dosahuje 310 [°C]. Maximální hodnota teploty 367 [°C] je dosažena v 82 [s] po odlití. Pak následuje pomalý postupný pokles teploty, která v 236 [s] po odlití činí 298 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce roste ihned po odlití, maximální hodnota teploty 364 [°C] je docílena v 88 [s] po odlití. Pak následuje pomalé ochlazování a v 236 [s] po odlití teplota činí 296 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce začíná růst za 1,5 [s] po odlití. Dochází k postupnému zvyšování teploty na maximální hodnotu 337 [°C], pak teplota velmi pomalu klesá. V 236 [s] po odlití dosahuje hodnotu 293 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce se začíná zvyšovat za 4 [s] po odlití maximální hodnotu 310 [°C] dosahuje ve 114 [s] po odlití. Pak teplota velmi zvolna klesá a v 236 [s] po odlití dosahuje hodnotu 290 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. II ($T_F = 210$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila - základní nástřik 0,05 [mm] a funkční nástřik 0,4 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – tepelná osa odlitku; teplota přehřátí taveniny je 720 [°C]; doba lití je 4 [s]. Tuhnutí odlitku probíhá po dobu 73 [s] v intervalu teplot 595 a 575 [°C], pak následuje pomalé ochlazování odlitku. V okamžiku 197 [s] po odlití je teplota 365 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste ihned za 2 [s] po odlití, poměrně strmým způsobem. Maximum 438 [°C] dosahuje v 61 [s] po odlití. Tato teplota přetrvává až do 93 [s] po odlití. Pak následuje pomalý pokles teploty až do 197 [s] po odlití, teplota činí 345 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce roste za 2 [s] po odlití, která roste pozvolněji a v okamžiku 36 [s] tato teplota činí 301 [°C]. Pak teplota roste a maximální hodnotu 324 [°C] dosahuje ve 100 [s] po odlití. Dále následuje pozvolný pokles teploty ve 197 [s] po odlití teplota činí 305 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce roste od 6 [s] po odlití. Teplota roste velmi pozvolna a ve 14 [s] po odlití dosahuje 225 [°C]. Maximální hodnotu 292 [°C] dosahuje ve 114 [s] po odlití, pak následuje pomalé ochlazování a v 196 [s] činí 284 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce roste od 12 [s] po odlití. Ve 14 [s] dosahuje teplotu 220 [°C]. Teplota dále roste a v 114 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu, která činí 290 [°C]. Pak teplota klesá a v 196 [s] po odlití dosahuje 284 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce roste od 18 [s] po odlití. Maximální hodnotu 285 [°C] dosahuje ve 156 [s] po odlití, pak teplota mírně klesá.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 250 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. II

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 4,5 [s], teplota přehřátí taveniny je 723 [°C], doba tuhnutí odlitku je 65 [s] při teplotě 600 až 575 [°C]. Pak následuje poměrně rychlý pokles teploty, ve 195,5 [s] po odlití teplota činí 357 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy roste ihned po odlití, zprvu intenzivněji, pak pozvolněji. Maximální teplota 355 [°C] se ustavuje v 86 [s] po odlití. Pak teplota klesá a v 195,5 [s] dosahuje 289 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat za 1 [s] po odlití. Maximální teplota 320 [°C] je dosažena v 95 [s] po odlití. Ve 195,5 [s] po odlití dosahuje teplotu 287 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat 1,5 [s] po odlití. Maximální teplota 300 [°C] se ustavuje ve 109 [s] po odlití. Pak následuje postupné mírné klesání teploty. Ve 195,5 [s] po odlití teplota činí 285 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy se ve vzdálenosti 15 [mm] od líce formy začíná zvyšovat od 4,5 [s] po odlití. Maximální teplota 291 [°C] je dosažena ve 125 [s] po odlití. Ve 195,5 [s] po odlití teplota vykazuje 280 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce se začíná zvyšovat od 16 [s] po odlití velmi pozvolna. Ve 149 [s] po odlití teplota činí 259 [°C]. Pak následuje mírný pokles teploty, která je 258 [°C] ve 195,5 [s] po odlití.

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. III ($T_F = 195$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila - základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 0,8 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny je 710 [°C], doba lití je 3 [s] (následuje odvodu tepla přehřátí taveniny). Tuhnutí odlitku které trvá 120 [s] v teplotním intervalu 595 a 575 [°C], je následováno pomalým ochlazováním odlitku. V časovém okamžiku 197 [s] po odlití tato teplota činí 445 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá pozvolně ihned po odlití. V 17 [s] po odlití dosahuje teplota 245 [°C], pak následuje pozvolný nárůst a maximální hodnotu 296 [°C] dosahuje ve 115 [s] po odlití. Tato teplota se do 151 [s] po odlití příliš nemění a pak následuje pokles ve 197 [s] po odlití na teplotu 286 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat za 4 [s] po odlití. Tato teplota vzrůstá pozvolně a v 17 [s] po odlití činí 218 [°C]. Pak ještě pomalu vzrůstá a

maximální hodnotu dosahuje ve 135 [s] po odlití, kdy tato teplota činí 278 [°C]. Pak teplota pomalu klesá a ve 197 [s] po odlití dosahuje 275 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná růst v 7 [s] po odlití. Teplota roste velmi pozvolna a v 37 [s] po odlití tato teplota činí 224 [°C], pak ještě nepatrně vzrůstá a ve 37 [s] po odlití tato teplota činí 227 [°C]. Maximální hodnotu 242 [°C] dosahuje v 85 [s] po odlití a ta přetrvává až do 197 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] roste od 11 [s] po odlití. Ve 37 [s] teplota činí 218 [°C], dále je její vzrůst pozvolný a v 85 [s] dosahuje maximum 246 [°C] a tato teplota se ustavuje až do 197 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce začíná růst v 16 [s] po odlití a maxima dosahuje ve 162 [s] po odlití. Tato teplota je 243 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde teploty jsou nižší než 240 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. III

Křivka č. 1 - teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 720 [°C]. Doba tuhnutí odlitku je 136 [s] v teplotním intervalu 600 až 575 [°C]. Pak následuje pokles teploty, která v 196 [s] po odlití činí 514 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy vzrůstá ihned po odlití postupným pozvolným způsobem. Na křivce není patrný pokles teploty, který by charakterizoval vznik vzduchové mezery. Ve 196 [s] po odlití je dosažena teplota 338 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy se ve vzdálenosti 3 [mm] od líce zvyšuje ihned po odlití postupným a pozvolným způsobem. Ve 192 [s] po odlití teplota vykazuje hodnotu 310 [°C]. Pak teplota nepatrně klesá na 306 [°C], která se ustavuje ve 196 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá za 1 [s] po odlití. Ve 196 [s] po odlití dosahuje hodnotu 285 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vzrůstá za 1,5 [s] po odlití. Ve 196 [s] po odlití dosahuje hodnotu 278 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá za 2 [s] po odlití. Ve 196 [s] po odlití dosahuje hodnotu 264 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. IV ($T_F = 190$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila - základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 1,2 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 - teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny je 730 [°C], doba lití činí 3 [s], po následném odvodu tepla přehřátí, probíhá tuhnutí odlitku po dobu 150 [s] v intervalu teplot 600 až 575 [°C], Pak následuje pomalé ochlazování odlitku. Teplota ve 197 [s] po odlití činí 525 [°C].

Křivka č. 2 - teplota líce formy začíná mírně vzrůstat od 7 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití teplota vykazuje 230 [°C] a dále též pomalu roste. Maximální hodnotu 267 [°C] dosahuje v 74 [s] po odlití a od 89 [s] po odlití teplota pomalu klesá. Ve 197 [s] po odlití dosahuje 260 [°C].

Křivka č. 3 - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy začíná pomalu vzrůstat od 9 [s] po odlití a v 17 [s] dosahuje teplota hodnotu 210 [°C] a dále velmi pozvolně vzrůstá. Maximální hodnotu dosahuje ve 123 [s] po odlití, kdy tato teplota činí 260 [°C]. Dále pak velmi nepatrně klesá a ve 197 [s] po odlití má hodnotu 255 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá velmi pomalu od 12 [s] po odlití. Ve 37 [s] po odlití dosahuje 207 [°C] pak se ještě teplota zvyšuje a dosahuje ve 176 [s] po odlití maximum 242 [°C], tato teplota přetrvává až do 197 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy se ve vzdálenosti 15 [mm] od líce zvyšuje od 14 [s]. Maximální hodnotu 230 [°C] dosahuje ve 180 [s] po odlití. Tato teplota se udržuje až do 197 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce se zvyšuje od 15 [s] a maximální hodnotu dosahuje ve 185 [s] po odlití. Tato teplota je 210 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 210 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. IV

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba tuhnutí odlitku je 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 735 [°C]. Doba tuhnutí je 144 [s] v teplotním intervalu 600 až 575 [°C]. Pak následuje pokles teploty, která ve 196 [s] po odlití je 510 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, vzrůstá po odlití a vykazuje postupně rostoucí charakter. Ve 196 [s] po odlití vykazuje hodnotu 305 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá za 2 [s] po odlití. Ve 196 [s] po odlití se ustavuje na hodnotě 290 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá za 2,5 [s] po odlití, má pozvolný charakter. Ve 196 [s] po odlití vykazuje hodnotu 275 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce roste za 3 [s] po odlití postupným způsobem. Ve 196 [s] po odlití dosahuje hodnotu 265 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy se ve vzdálenosti 22 [mm] od líce zvyšuje od 3,5 [s] po odlití. Ve 196 [s] po odlití hodnota teploty činí 240 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. V ($T_F = 200$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila - základní nástřík 0,05 [mm] a funkční nástřík 2,2 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – tepelná osa odlitku, teplota přehřátí taveniny je 700 [°C], doba lití 3 [s], pak následuje odvodu tepla přehřátí taveniny. Tuhnutí odlitku probíhá po dobu 225 [s], při teplotě 600 až 575 [°C]. Pak následuje ochlazování odlitku. V 297 [s] po odlití je teplota 500 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, vykazuje velmi pozvolný vzrůst, resp. plochou charakteristiku. Začíná vzrůstat v 10 [s] po odlití. Ve 27 [s] po odlití teplota vykazuje 235 [°C] (to je vzrůst jen o 35 [°C] proti počáteční teplotě formy). Dále teplota nepatrně roste a ve 110 [s] po odlití dosahuje 254 [°C], pak následuje pokles na 250 [°C] a tato teplota se udržuje až do 297 [s] po odlití.

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá též velmi nepatrně od 14 [s] po odlití. Ve 27 [s] po odlití dosahuje teplotu 212 [°C]. Maximální teplotu 242 [°C] vykazuje od 120 [s] po odlití až do 297 [s] po odlití.

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá velmi nepatrně od 20 [s] po odlití. Ve 27 [s] činí 208 [°C] a dále mírně roste až na maximální hodnotu 236 [°C], která je od 135 [s] po odlití. Na této hodnotě se udržuje až do 297 [s] po odlití.

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vzrůstá velmi nepatrně od 22 [s] po odlití. Ve 27 [s] po odlití činí 204 [°C]. Maximální hodnota teploty je 230 [°C] ve 140 [s] po odlití a nemění se až do 297 [s] po odlití.

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá velmi nepatrně od 25 [s] po odlití. Ve 27 [s] po odlití teplota činí 202 [°C]. Pak nepatrně roste a maximální hodnotu 210 [°C] dosahuje ve 150 [s] po odlití.

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 204 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. V

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 690 [°C], doba tuhnutí odlitku je 242 [s] v intervalu teplot 600 až 575 [°C]. V 296 [s] po odlití je teplota 535 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy se začíná zvyšovat za 5 [s] po odlití. Růst teploty je velmi pozvolný. V 296 [s] po odlití teplota vykazuje hodnotu 265 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá za 6,5 [s] po odlití velmi pozvolným způsobem. Ve 296 [s] po odlití vykazuje teplota hodnotu 280 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce roste od 7 [s] po odlití velmi pozvolně. V 296 [s] po odlití teplota činí 270 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vzrůstá od 8 [s] po odlití též velmi pozvolně. Ve 296 [s] po odlití vykazuje teplota hodnotu 260 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá od 10 [s] po odlití. Ve 296 [s] po odlití je dosažena hodnota teploty 255 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. VI ($T_F = 235$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila - jen základní vodivý nástřik 0,2 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny je 735 [°C], doba plnění formy je 2 [s], po odvodu tepla přehřátí taveniny následuje tuhnutí odlitku, které probíhá po dobu 54 [s] v intervalu teplot 595 až 575 [°C]. Pak následuje ochlazování odlitku. Ve 198 [s] po odlití teplota činí 375 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, vzrůstá ihned po odlití. Poměrně prudce vzrůstá a za 5 [s] po odlití teplota činí 439 [°C] s následnou teplotní prodlevou, která je 2 [s], což je pravděpodobně v důsledku vzniku plynové vrstvy mezi odlitkem a formou. Pak teplota mírně vzrůstá a ve 22 [s] po odlití je docílena její maximální hodnota, která je 460 [°C]. Pak následuje pokles teploty a ve 198 [s] po odlití je teplota na lici formy již jen 329 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce vzrůstá ihned po odlití, avšak mírněji než na lici. V 17 [s] po odlití vykazuje 360 [°C], pak dále roste. Maximální hodnota teploty je 395 [°C] ve 25 [s] po odlití. Pak teplota již jen klesá a ve 198 [s] po odlití je 303 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce vzrůstá za 5 [s] po odlití. Ve 13 [s] po odlití je 279 [°C] a dále roste. Maximální teplotu 327 [°C] dosahuje od 41 do 60 [s] po odlití, pak teplota klesá a ve 198 [s] po odlití je teplota již pouze 290 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce vzrůstá od 12 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití je teplota 240 [°C]. Dále teplota pomalu roste a v 68 [s] po odlití dosahuje maximální hodnotu 312 [°C] a pak opět klesá. Ve 198 [s] po odlití vykazuje hodnotu 285 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce vzrůstá od 14 [s] po odlití. Maximální hodnotu 290 [°C] dosahuje od 75 do 130 [s] po odlití, pak teplota klesá a v 198 [s] po odlití je 285 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 280 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. VI

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 690 [°C], tuhnutí odlitku probíhá po dobu 62 [s] v teplotním intervalu 600 až 575 [°C]. pak následuje postupný pokles teploty na hodnotu 300 [°C], která je v 236 [s] po odlití.

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat ihned při lití. Zprvu je nárůst strmější, ve 14 [s] po odlití je již teplota 345 [°C]. Pak následuje další zvyšování na maximální hodnotu 400 [°C], která je dosažena v 80 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty. V 236 [s] po odlití teplota činí 300 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat od 1 [s] po odlití. Maximální hodnotu 350 [°C] vykazuje v 76 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty, která v 236 [s] po odlití činí 298 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce se zvyšuje od 1,5 [s] po odlití. Maximální teplota 345 [°C] je dosažena v 87 [s] po odlití. Ve 236 [s] po odlití je teplota 295 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce se zvyšuje ve 2 [s] po odlití. Maximální hodnota 340 [°C] je dosažena v 97 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty, která ve 236 [s] po odlití činí 293 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy se ve vzdálenosti 22 [mm] od líce zvyšuje od 5 [s] po odlití. Teplota postupně vzrůstá až na maximální hodnotu 300 [°C], která se ustavuje ve 113 [s] po odlití. Pak teplota klesá a v 236 [s] po odlití dosahuje hodnotu 285 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

Měření č. VII ($T_F = 230$ [°C], AlSi10MgMn; ocelová kokila – jen základní vodivý nástřik 0,4 [mm]); hodnocení křivek je směrem od shora.

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku; teplota přehřátí taveniny je 720 [°C], doba plnění formy je 3 [s]. Po odvodu tepla přehřátí taveniny následuje tuhnutí odlitku, které trvá 68 [s] v teplotním intervalu 600 a 575 [°C]. Pak následuje ochlazování odlitku. Ve 197 [s] po odlití teplota činí 350 [°C].

Křivka č. 2 – teplota líce formy, vzrůstá ihned po odlití strmě. V 17 [s] po odlití teplota vykazuje mírnou prodlevu při níž teplota činí 357 [°C] a pak teplota pozvolněji vzrůstá. Maximální hodnotu 390 [°C] dosahuje v 82 [s] po odlití, pak následuje neustálý pokles teploty, který ve 197 [s] po odlití činí 315 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] po odlití vzrůstá za 4 [s] po odlití. V 17 [s] po odlití dosahuje 315 [°C]. Maximální hodnota teploty 381 [°C] je v 78 [s] po odlití, pak teplota klesá a ve 197 [s] po odlití je 312 [°C].

Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce začíná vzrůstat v 8 [s] po odlití a její průběh je pozvolnější. V 17 [s] po odlití dosahuje teplota 266 [°C]. Maximální teplota je v 95 [s] po odlití a činí 345 [°C], pak teplota celkem pozvolně klesá. Ve 197 [s] po odlití je teplota 315 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce pomalu vzrůstá od 14 [s] po odlití a v 17 [s] po odlití dosahuje hodnotu 242 [°C]. Maximální teplota 315 [°C] je dosažena v 82 [s] po odlití, pak teplota pomalu klesá a ve 197 [s] po odlití dosahuje 290 [°C].

Křivka č. 6 – teplota formy ve vzdálenosti 22 [mm] od líce roste od 16 [s] po odlití. Maximální hodnotu 239 [°C] dosahuje v 96 [s] po odlití, pak teplota klesá a ve 197 [s] po odlití je teplota 285 [°C].

Křivky č. 7,8,9,10,11; teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy (30 [mm] a dále) a nenaznačují výrazné prohřívání formy, zde jsou teploty nižší než 280 [°C].

Výsledky simulačního výpočtu měření č. VII

Křivka č. 1 – teplota v tepelné ose odlitku, doba lití je 4 [s], teplota přehřátí taveniny je 730 [°C], tuhnutí probíhá po dobu 69 [s] v teplotním intervalu 600 až 575 [°C]. Pak následuje postupný pokles teploty na hodnotu 318 [°C], která je v 236 [s] po odlití.

Křivka č. 2 – teplota líce formy začíná vzrůstat ihned při lití. Zprvu je nárůst strmější, v 10 [s] po odlití je již teplota 330 [°C]. Pak následuje další zvyšování na maximální hodnotu 391 [°C], která je dosažena v 72 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty. V 236 [s] po odlití teplota činí 297 [°C].

Křivka č. 3 – teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce začíná vzrůstat od 3 [s] po odlití. Maximální hodnotu 350 [°C] vykazuje v 86 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty, která v 236 [s] po odlití činí 295 [°C].

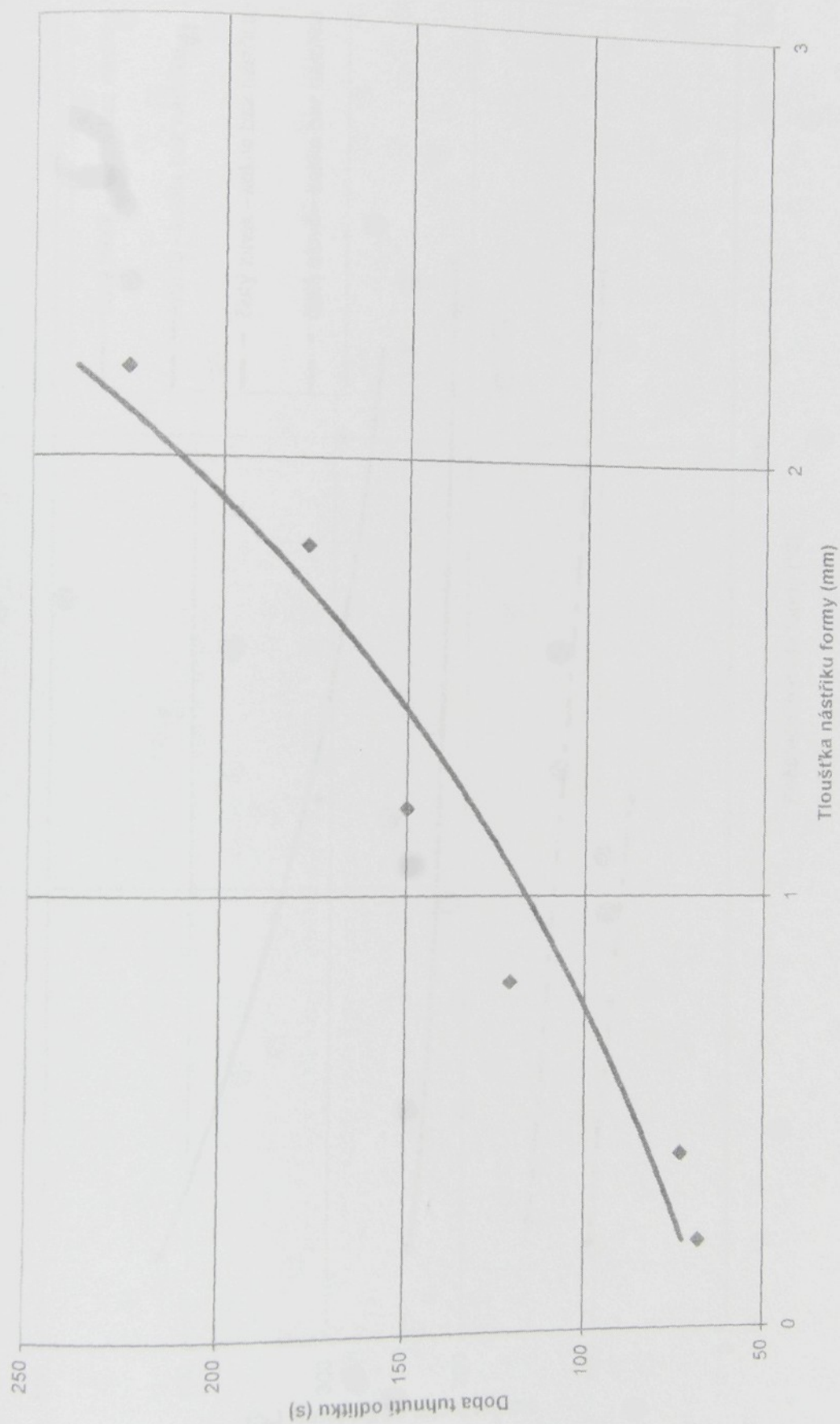
Křivka č. 4 – teplota formy ve vzdálenosti 10 [mm] od líce se zvyšuje v 4,5 [s] po odlití. Maximální teplota 348 [°C] je dosažena v 91 [s] po odlití. Ve 236 [s] po odlití je teplota 290 [°C].

Křivka č. 5 – teplota formy se ve vzdálenosti 15 [mm] od líce zvyšuje od 6 [s] po odlití. Maximální hodnota 340 [°C] je dosažena v 97 [s] po odlití. Pak následuje pokles teploty, která v 236 [s] po odlití činí 285 [°C].

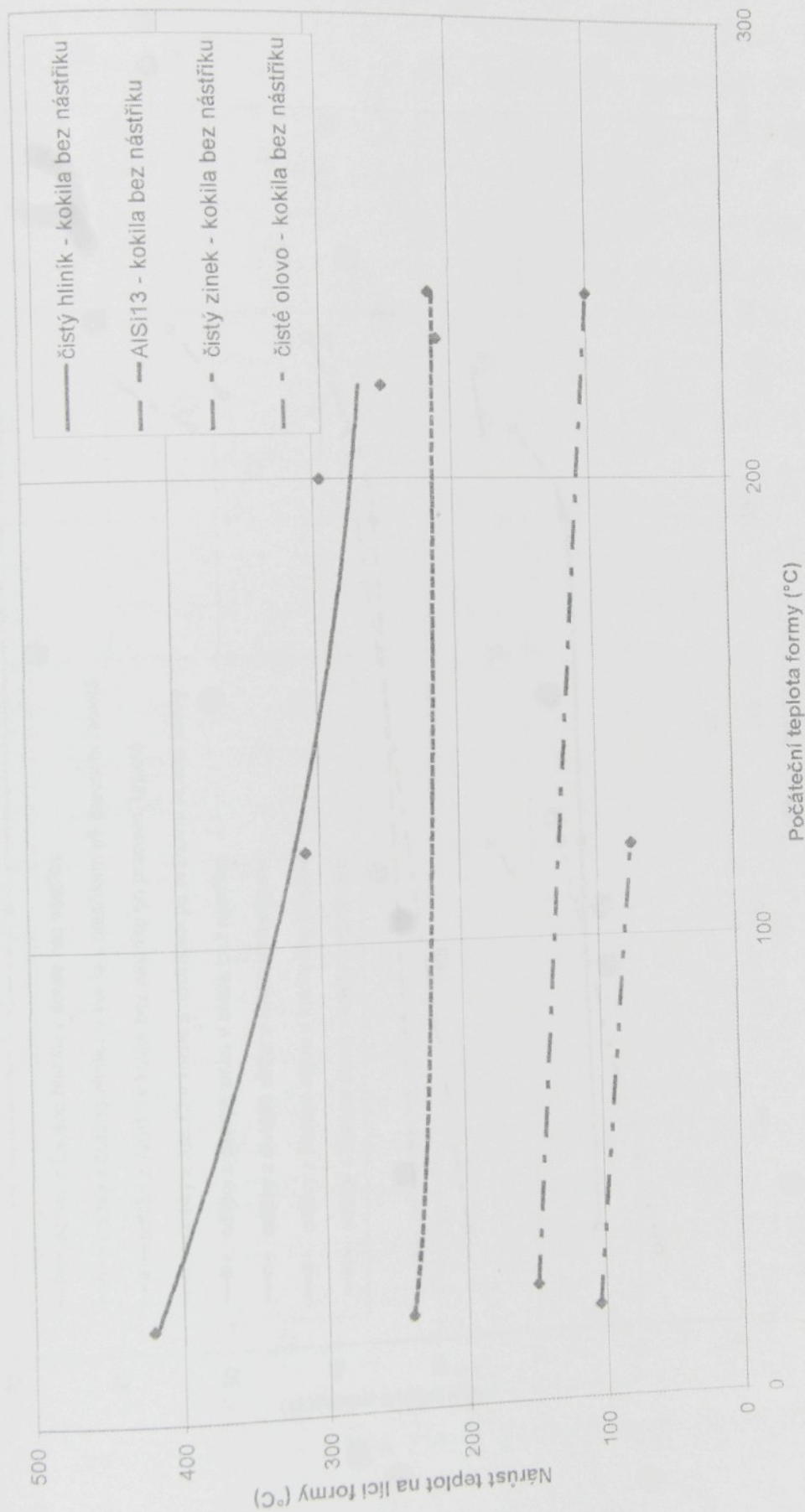
Křivka č. 6 – teplota formy se ve vzdálenosti 22 [mm] od líce zvyšuje od 8 [s] po odlití. Teplota postupně vzrůstá až na maximální hodnotu 305 [°C], která se ustavuje ve 115 [s] po odlití. Pak teplota klesá a v 236 [s] po odlití dosahuje hodnotu 280 [°C].

Křivky č. 7, 8, 9, 10, 11 – svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

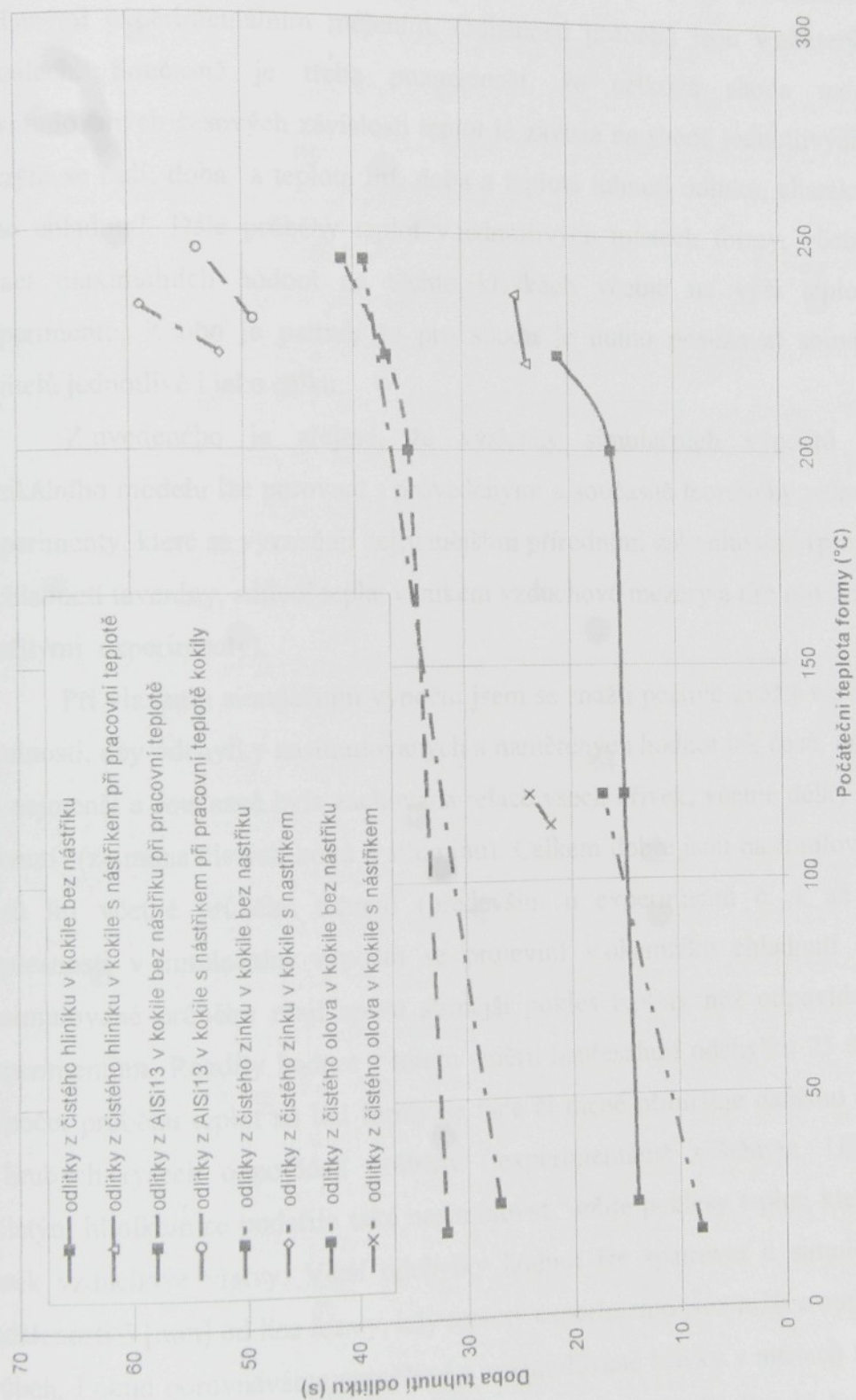
Na základě výsledků experimentů byly sestrojeny následující závislosti, tak jak je patrné z obr. 8. 17 až 8.19. Závislost doby tuhnutí odlitku tvaru desky 200 x 200 x 20 mm na tloušťce nástřiku líce formy při téměř srovnatelné teplotě přehřevu kokily (obr. 8.17), maximální teplotní gradienty na líci formy při její různé počáteční teplotě (obr. 8.18) a závislost doby tuhnutí odlitku tvaru desky 200 x 200 x 20 mm na teplotě litinové kokily (ČSN 42 2420) při různých technologických podmínkách (obr. 8.19). Ze závislostí je zřejmé a fyzikální podstata dějů to potvrzuje, že s rostoucí tloušťkou nástřiku (při srovnatelných experimentálních podmínkách) vzrůstá i doba tuhnutí odlitků v kokile. Současně z výsledků je zřejmé, že při nízké počáteční teplotě formy se ustavují vyšší teplotní gradienty na líci formy a s rostoucí počáteční teplotou formy se teplotní gradienty na líci formy zmenšují, jak ukazuje obr. 8.17 (pro litinovou kokilu). Z obr. 8.18 je opět patrný vliv nástřiku formy na dobu tuhnutí odlitku v porovnání s tuhnutím odlitků v kokile bez nástřiku.



Obr. 8.17 Vliv tloušťky nástřiku formy na dobu tuhnutí odlitku tvaru desky (při srovnatelných podmínkách)



Obr. 8.18 Závislost nárůstu teploty líc litinové kokily vzhledem k počáteční teplotě formy při odlévání vybraných slévarenských materiálů



Obr. 8.19 Závislost doby tuhnutí odlitku na počáteční teplotě formy a ošetření líce formy nástříkem (0,35 mm)

8.9. Celkové zhodnocení simulačních výpočtů

Ze získaných nasimulovaných časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku a v kokile je patrné, že celkem jejich průběhy v základních rysech jsou shodné s průběhy získanými experimentálním měřením. Odlišnosti průběhů jsou v některých dílčích detailech. Současně je třeba poznamenat, že celková shoda naměřených a nasimulovaných časových závislostí teplot je závislá na shodě jednotlivých činitelů ke kterým se řadí: doba a teplota lití, doba a teplota tuhnutí odlitku, charakter a průběh jeho chladnutí. Dále průběhy teplot v jednotlivých místech formy, včetně časových relací maximálních hodnot na těchto křivkách včetně na výši teploty v závěru experimentu. Z toho je patrné, že pro shodu je nutno posuzovat souvislost těchto činitelů jednotlivě i jako celku.

Z uvedeného je zřejmé, že výsledky simulačních výpočtů na základě fyzikálního modelu lze porovnat s provedenými a současně teoreticky velmi náročnými experimenty, které se vyznačují nejrůznějšími přírodními zákonitostmi (prodění, tuhnutí a chladnutí taveniny, sdílení tepla, vznikem vzduchové mezery a tím pro fyzikální popis složitými experimenty).

Při vlastním simulačním výpočtu jsem se snažil pečlivě zvážit všechny důležité okolnosti, aby odchylky nasimulovaných a naměřených hodnot jak časů, tak teplot byly co nejmenší a současně byla zachována relace všech křivek, včetně délky prodlevy při tuhnutí (zejména čistých kovů a siluminu). Celkem dobře jsou nasimulovány hodnoty časů lití včetně průběhů tuhnutí (především u experimentů č. 1 až 17). Určité nepřesnosti v simulačním výpočtu se projevují v okamžiku chladnutí odlitku, kdy nasimulované průběhy mají zprvu strmější pokles teploty než odpovídá příslušným experimentům. Rozdíly hodnot v tomto směru nepřesahují odchylku 25 %. Simulační výpočet průběhu teplot na lici formy se více či méně přibližuje danému experimentu. V hrubých rysech odpovídají průběhy experimentálně zjištěným. U experimentů s čistým hliníkem se podařilo také nasimulovat určité poklesy teplot, které signalizují vznik vzduchové vrstvy. Větší odchylky hodnot lze spatřovat u simulací teplot ve vzdálenosti 3 [mm] od líce formy, kdy teploty experimentu jsou nižší a mají pozvolnější průběh. Pokud porovnáváme naměřené a nasimulované křivky v místech vzdálenějších od líce formy je patrná jejich větší časová a teplotní shoda. Rozdíl hodnot v tomto smyslu nepřesahuje 15 %.

Větší nepřesnosti simulačního výpočtu lze sledovat u experimentů (č. I. až VII). Zde se nepodařilo přesně nasimulovat průběh teplot solidu a likvidu tuhnutí dané slitiny AlSi10MgMn.

Ze získaných časových závislostí teplot vyplývají některé skutečnosti, jako např.

- a) je-li počáteční teplota formy nízká, za srovnatelných podmínek experimentů, probíhá tuhnutí odlitků stejného modulu kratší dobu. A chladnutí odlitků probíhá intenzivněji než ve formě ohřáté na vyšší počáteční teplotu.

- b) je-li počáteční teplota formy vyšší, pak doby dosažení maximální teploty v příslušných místech formy jsou také delší.

- c) značné tloušťky nástřiků líce formy ovlivňují intenzitu množství tepla přestupujícího z taveniny, resp. odlitku do kokily. A v důsledku toho forma stačí malé množství tepla rozvést (díky svým tepelným vlastnostem) tak, že nedochází k velkým teplotním gradientům ve formě, jak je zřejmé z měření č. III, IV, V.

8.10. Vyhodnocení teplotních závislostí součinitelů prostupu tepla β

Pokud hodnotím hodnoty součinitelů prostupu tepla v závislosti na teplotě pro jednotlivé experimenty, jak jsou uvedeny v tabulce 8-7 a 8-8, pak je třeba konstatovat, že při nalití taveniny do formy, kdy dochází k těsnému styku, jsou hodnoty součinitele poměrně vysoké a jejich hodnota závisí nejen na podmínkách (nástřik líce formy nebo předeřtí kokily), ale také na typu odlévaného materiálu. Současně ze získaných závislostí je patrný skok hodnoty součinitele prostupu tepla, který vždy odpovídá určité teplotě (nebo teplotnímu intervalu), která udává teplotu tání (nebo teplotu krystalizace). To znamená, že při tuhnutí odlitku, kdy se vytváří vzduchová vrstva mezi odlitkem a kokilou, přestává být těsný styk. Součinitel prostupu tepla se výrazně snižuje. Také rostoucí teplota předeřevu kokily snižuje hodnoty součinitele prostupu tepla v celé teplotní závislosti (20 až 800 °C). Při odlévání čistého hliníku do studené kokily je maximální hodnota součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotě 4000 [W.m⁻².K⁻¹], ohřátá kokila na pracovní teplotu (220 °C) již tento součinitel snižuje na hodnotu 3600 [W.m⁻².K⁻¹], a funkční nástřik teplé kokily na hodnotu cca 2550 [W.m⁻².K⁻¹]. Z hodnot součinitele přestupu tepla získaných při odlévání čistého hliníku do litinové kokily je zřejmé, že tloušťka funkčního nástřiku líce formy o hodnotě 0,30 [mm] a současně

zahřátí kokily na pracovní teplotu také výrazně snižuje tyto hodnoty a to asi o 30% a funkční nástřik cca o hodnotu 40 %. Podobné výsledky jsou zřejmé z experimentů při odlévání slitiny AlSi13, kdy hodnota součinitele přestupu tepla je pro nepředehřátou kokilu při teplotě 800 [°C] 3800 [W.m⁻².K⁻¹], opět předehřátá kokila snižuje součinitel prostupu tepla na hodnotu cca 3500 [W.m⁻².K⁻¹], a nástřik kokily na hodnotu 2400 [W.m⁻².K⁻¹], tj. o cca 40 %. Poměrně vysoké hodnoty součinitele prostupu tepla lze spatřovat při odlévání čistého zinku, od teploty 500 až 800 [°C] je tato hodnota 6000 [W.m⁻².K⁻¹]. Z výsledků je opět zřejmé snížení hodnot součinitele prostupu tepla s rostoucí teplotou předehřevu kokily. Také tloušťka funkčního nástřiku líce formy 0,30 [mm] maximální hodnoty součinitele snižuje až na hodnoty 3600 [W.m⁻².K⁻¹], tj. proti maximální hodnotě součinitele prostupu tepla získané na studené kokile o téměř o 40 %. Podobné výsledky jsou patrné i z experimentů odlévání čistého olova do litinové kokily. Při odlévání do studené kokily jsou hodnoty od teploty 600 až do 800 [°C] konstantní a dosahují 4500 [W.m⁻².K⁻¹], se vzrůstající teplotou předehřevu a ošetřením líce kokily nástřikem (0,30mm) jsou opět hodnoty součinitele prostupu tepla při vyšších teplotách nižší, snížení je až o 38 %.

Pokud hodnotím součinitele prostupu tepla při odlévání slitiny AlSi10MgMn, je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou nátěru hodnoty klesají a nejnižší jsou pro velkou tloušťku nástřiku 2,25 [mm], kdy součinitel dosahuje i při vysokých teplotách jen 200 [W.m⁻².K⁻¹].

Experimenty (viz měření č.VI,VII) se základním podkladovým nástřikem ukazují, že jde o nástřik izolační, neboť při srovnatelných podmínkách (tloušťka 0,2 mm, teplota formy cca 235 °C), kdy je maximální hodnota součinitele prostupu tepla 2600 [W.m⁻².K⁻¹], což je nižší hodnota než při použití funkčního a základního nástřiku (0,25 mm, teplota 250 °C) je maximální hodnota součinitele 2800 [W.m⁻².K⁻¹]. Při zvětšení tloušťky základního nástřiku na 0,4 [mm] je maximální hodnota tohoto součinitele ještě nižší, 1100 [W.m⁻².K⁻¹]. Sledování větších tlouštěk nátěrů má význam především pro simulaci nálitkových systémů.

8.11. Simulační výpočty tuhnutí odlitku tvaru desky

Na základě zjištěných výsledků teplotních závislostí součinitele prostupu tepla β , jak je uvedeno v předchozí části práce, byly provedeny simulační výpočty různých

odliteků ze slitin hliníku. Výpočty byly provedeny při použití simulačního výpočtového programu SIMTEC (RWP Aachen) a s tepelně-fyzikálními hodnotami jeho databáze. Výsledky uvedených simulačních výpočtů jsou v příloze č. 11.

9. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této práci přináší dílčí poznatky o problematice sdílení tepla v soustavě: **odlitek – mezeza – kokila**, především o vzniku mezery a součiniteli prostupu tepla mezerou. Výsledky mají sloužit jako potřebné informace o tepelných poměrech při gravitačním kokilovém lití, jejich ovlivňování a současně i možnostech zpřesňování prováděných simulačních výpočtů.

Odlévání do kovových slévárenských forem (kokil) je velmi složitý děj, jež je ovlivňován mnoha činiteli, a který lze popsat, kdyby se to vůbec podařilo, polyvariantní funkcí. Protože to nelze, zaměřil jsem se ne charakteristiku nejdůležitějších vlivů, tak jak je dále uvedeno.

Současně je ještě nutno upozornit, že řešená problematika, resp. získané poznatky a výsledky lze rozdělit do dvou hlavních částí:

- a) podrobné rozpracování teoretického základu včetně možností řešení tepelných simulačních výpočtů;
- b) provedení vlastních experimentů a následných simulačních výpočtů tepelných dějů mezi odlitkem a litinovou a ocelovou kokilou při gravitačním lití a získání teplotních závislostí součinitele prostupu tepla pro jednotlivé podmínky experimentů.

Výsledky a poznatky z řešení této práce lze shrnout do těchto hlavních oblastí:

1. Rozborem sledované problematiky lze uvést, že se jedná o velmi složitý proces nejen z pohledu teoretického, ale také praktického. Nehledě na to, že literární prameny mu věnují ve světě poměrně malou publicitu. Velmi přínosné jsou práce PŘIBYLA [11], ale také HAVLÍČKA [10],[23], kteří se věnovali této problematice především v hutním slévárenství, tj. při odlévání hmotných odliteků jednoduchých tvarů, které se odlévají do rozměrných tenkostěnných kokil, tak jak je pro hutnickou výrobu typické. Výhodou je, že probíhající děje jsou pomalé a dají se dobře registrovat a také teoreticky popisovat.

V oblasti aplikace výpočetní techniky na konkrétní problematiku tuhnutí a chladnutí odliteků převážně větších rozměrů mají publikace KAVIČKY a HLOUŠKA,

z velkého počtu lze uvést [24], [25], [26]. Ze zahraničních publikací lze připomenout práce SANTOSE [43], MARTORANA [44] LEWIS [51], KIMA a LEEA [63], kteří se zaměřili na výpočty tepelných dějů mezi odlitky z neželezných slitin a kokilou.

Z uvedeného rešeršního rozboru je patrné, že sledovaná problematika je velmi komplikovaná, neboť se do tepelných procesů mezi odlitkem a formou promítá velké množství navzájem se ovlivňujících faktorů (např. materiál, velikost, konstrukce a počáteční teplota formy, charakteristika odlévaného materiálu, odlitku i podmínky lití). Pro přesný popis tepelných dějů je možné použít z teoretického hlediska analytické metody řešení, avšak v současné době nejsme schopni vytvořit přesný matematický popis pro dané řešení. Proto v současné době mají větší praktické uplatnění numerické metody řešení u kterých lze získat v exaktním tvaru požadované výsledky. Jak je obecně známo, a výsledky této práce to také potvrzují, mezi odlitkem a kokilou při gravitačním lití vzniká vzduchová vrstva, která spolu s nátěrem a oxidickou vrstvou odlitku přispívá ke vzniku mezery (spáry). Mezera způsobuje odpor při transportu tepla z tuhnutí odlitku do kokily. Výsledné vlastnosti mezery na sdílení tepla lze charakterizovat pomocí součinitele prostupu tepla β . Pokud se týká samotného součinitele prostupu tepla, jeho fyzikální vyjádření prostřednictvím rovnice (3.6) je pro slévárenské účely dostačující.

2. Pokud sledujeme podmínky vzniku samotné vzduchové vrstvy, která je součástí mezery, je nutno připomenout, že závisí na mnoha činitelích. Obecně lze konstatovat, že vzniká v důsledku změny rozměrů kokily a v důsledku smršťování odlitku. K samotnému smršťování je nutné poznamenat následující okolnosti, se kterými bylo při sledování vzduchové vrstvy uvažováno.

Jak je obecně známo, pod pojmem smršťování rozumíme zmenšování objemu i rozměrů ztuhlého kovu nebo slitiny vzhledem k tavenině. V rámci utváření odlitku tj. v rozmezí od teploty lití až do teploty normální dochází k třem druhům smršťování:

a) ve stavu tekutém je to smršťování od okamžiku vlití taveniny do formy do počátku tuhnutí. Toto smršťování je největší a závisí na teplotě přehřátí taveniny;

b) při tuhnutí, začíná za teploty likvidu a končí za teploty solidu. Toto smršťování se označuje smršťování vnitřní a vzniká za uvolnění latentního tepla a končí při úplném ztuhnutí taveniny. Toto smrštění může být i negativní, tj. místo smrštění při úplném ztuhnutí taveniny. Toto smrštění může být i negativní, tj. místo smrštění může nastat i roztažení, tak jak je u litiny s lupínkovým grafitem, ale i u zinku, hliníku a antimonu, jak uvádí ČABELKA [57]. Naproti tomu např. měď, cín, olovo, vizmut začínají ihned smršťovat.

c) ve stavu tuhém, smrštění vzniká v rozmezí teploty solidu až do teploty okolí, tj. při ochlazování po úplném ztuhnutí až do vychladnutí na teplotu okolního vzduchu. Toto smrštění se nazývá smrštění vnější, které je pro konstrukci odlitku nejdůležitější.

Hodnota celkového smrštění je pak dána algebraickým součtem hodnot dílčích smrštění. Ve skutečnosti je situace ještě složitější, neboť rozlišujeme smrštění nejen lineární, ale také objemové. Kromě popsaných změn vznikají při ochlazování z polymorfních kovů nebo slitin ještě objemové změny, způsobené překrystalizací. Tyto změny jsou v porovnání se třemi druhy smršťování zanedbatelné.

Výsledkem smrštění je zkrácení rozměrů vůči rozměrům, které zaujala tavenina těsně po odlití. Míra smrštění může být na odlitcích v různých směrech různá. Smrštění závisí nejen na chemickém složení, teplotě lití, konstrukci odlitku, druhu formy. Např. právě při lití do kokily je smrštění vždy větší než smrštění v pískové formě. Nejmenší smrštění mají eutektické slitiny a největší smrštění vykazují slitiny, které mají ve struktuře chemické sloučeniny (např. speciální bronzy a mosazi). Současně také závisí na okamžiku, kdy začínají kovy smršťovat. Také záleží na době, kdy nastává smršťování odlitku. Tento čas je u různých kovů a slitin různý. Např. ocel na odlitky začíná smršťovat hned po odlití, naopak hliník smršťuje po odlití velmi zvolna.

Na základě prostudované problematiky, lze konstatovat, že vzduchová vrstva (zaplněná plyny nebo vzduchem) je mimo vrstvy nátěru, hlavní složkou mezery a její tloušťka je závislá na hlavních a vedlejších faktorech. Mezi hlavní faktory patří:

- a) lineárním smrštění tuhnoucího odlitku;
- b) dilataci kokily vlivem jejího prohřátí.

Vedlejší činitelé jsou deformace odlitku a deformaci kokily, lící teplota, rychlosti lití, způsobu lití, počáteční teplota kokily, tloušťka nátěru atd. Plynová vrstva vzniká za určitý časový úsek po odlití. Tato vrstva vytváří značný tepelný odpor vůči prostupujícímu teplu z odlitku do formy. Plynová vrstva se tvoří na plochách kolmých na podélný směr odlitku, tj. ve směru velkého lineárního smrštění. Tloušťka spáry je ovlivněna dilatací formy, proto se vytváří nejvíce při lici kovové formy.

3. Vlivem nátěru kokily na tloušťku mezery mezi odlitkem a formou se zabýval VEJNÍK [6], který přikládal značný význam nátěru kokily na tloušťku mezery a tím i na tepelné poměry mezi odlitkem a kovovou formou. Došel k závěru, že s rostoucí tloušťkou nátěru se zmenšuje tloušťka i rychlost růstu plynové vrstvy mezi odlitkem a formou (i když tloušťka mezery roste, neboť jí tvoří kromě plynové vrstvy ještě

oxidická vrstva odlitku a nástrík nebo nátěr líce kokily). To je způsobeno větší tepelnou izolací a tím menší intenzitou prostupu tepla, což způsobuje rychlost tuhnutí. Svými pokusy došel k závěru, že se plynová vrstva tvoří v době mezi okamžikem odvodu tepla přehřátí a okamžikem úplného ztuhnutí odlitku, tj. po vytvoření povrchové vrstvičky tuhnutí odlitku. V oblasti hutního slévárenství zcela podrobným způsobem popisuje vznik mezery a její ovlivnění charakterem nátěru líce kokily HAVLÍČEK [11].

4. Pokud hodnotíme práci nejen z hlediska výsledků prováděných experimentů odlévání, ale také z hlediska provedených simulačních výpočtů tepelných dějů s využitím simulačního programu SIMTEC, je nutno konstatovat, že právě tuto problematiku lze považovat za velmi složitou, neboť dosáhnout poměrně shodné namodelování (nasimulování) experimentálně sledovaných časových teplot v odlitku a kokile je velmi obtížné. Pokud se jedná o charakteristiku programu SIMTEC, použitá verze je založena na Fourierově diferenciální rovnici prostorového vedení tepla a to umožňuje simulovat tepelné procesy především v kovových soustavách. Současně také zahrnuje nejen vliv plnění dutiny formy, ale také přechodového odporu mezery. Výrazný vznik mezery je patrný z průběhu teploty na lici formy, která vykazuje nárůst a následný pokles. To je patrné např. při hutním odlévání do kokil, kdy mezi ingotem a kokilou vzniká až několikacentimetrová spára, ve které se projevuje sálavé teplo tuhnutí odlitku. Ve formách menších rozměrů, jako je tomu v mém případě, není vždy patrný při vzniku spáry výrazný nárůst a následný pokles teploty. To je způsobeno tím, že mezi odlitkem a kokilou (jak bylo experimentálně naměřeno) vzniká tloušťka vzduchové vrstvy maximálně několik desetin mm. A s rostoucí teplotou předehřevu kokily a vrstvou ochranného nátěru líce se její hodnota ustavuje na 0,1 [mm].

5. Měřicí zařízení pro sledování časových závislostí teplot v odlitku a ve formě plně odpovídá požadavkům moderních měřících metod, tak jako termoelektrické články švýcarské výroby fy LEMO. Pokud se týká rozměrů obou kokil, je třeba poznamenat, že litinová kokila o rozměrech 400 x 300 x 200 [mm] splňovala hlavně fyzikální předpoklad jednosměrného sdílení tepla. Materiál ocelové kokily (ČSN 19 552) již byl navržen v souladu s použitím materiálu kokil pro gravitační lití v automobilovém průmyslu.

Jak je ve slévárenské praxi známé, gravitačním litím do kokil se vyrábí velmi funkčně důležité odlitky jako např. bloky nebo písty spalovacích motorů ze slitin hliníku.

Pokud se jedná o měření teploty líce formy při tuhnutí a chladnutí odlitku, bylo respektováno, aby čidlo termočlánku bylo vhodným způsobem zabudováno na líc formy a tím nedocházelo k ovlivňování odvodu tepla z měřeného místa formy a tím byla snaha zabezpečit stejné podmínky měření teploty na lici formy.

6. Z celkového množství prováděných experimentů byly vybrány experimenty, které v plné šíři charakterizují specifika probíhajících tepelných dějů mezi odlitkem a kovovou formou při gravitačním lití. Výsledky experimentů získané při řešení této práce lze charakterizovat takto:

a) Při provádění jednotlivých skupin experimentů bylo dbáno, aby pokud možno byla stejná teplota odlévání. Jak je známo, vyšší teplota lití prodlužuje dobu tuhnutí odlitku.

b) Z experimentů odlévání čistého hliníku je zřejmé, že čím je nižší teplota formy (to odpovídá fyzikálním zákonitostem přestupu tepla), tím je kratší doba tuhnutí odlitku, to lze vysvětlit vyšší intenzitou ochlazovací schopnosti slévárenské formy. Současně je zřejmý vyšší teplotní gradient mezi povrchem odlitku a lícem slévárenské formy, který je cca $425\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ při odlévání do kokily $20\text{ [}^{\circ}\text{C]}$. Odpovídající jsou i teplotní gradienty mezi vzdálenějšími místy kokily. Ve vzdálenosti vyšší než je 30 [mm] od líce formy se teplotní gradienty neustále snižují.

Naopak s rostoucí teplotou předehřevu kokily se gradienty teplot mezi jednotlivými místy kokily snižují.

c) Podobné poznatky jsou zřejmé i z odlévání siluminu, avšak teplotní gradienty při odlévání do studené kokily (cca $20\text{ [}^{\circ}\text{C]}$) a do kokily ohřáté na pracovní teplotu (cca $220\text{ [}^{\circ}\text{C]}$) nejsou tak výrazné jako při odlévání čistého hliníku. Tyto výsledky lze sledovat i při odlévání čistého zinku a olova. Z výsledků je zřejmé, že čím je nižší teplota tavení, tím vzniká nižší teplotní gradient na lici formy. To také do jisté míry souvisí i s hodnotou latentního krystalizačního tepla odlévaného materiálu (čistý hliník $397\,163\text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$; čistý zinek $112\,206\text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$; čisté olovo $23\,865\text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$). Tato úvaha však není v souladu s krystalizačním teplem slitiny AlSi13, která podle literárních údajů činí $513\,335\text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$. Obecně platí, že tuhnutí odlitku ze slitiny kovů trvá delší dobu a tím lze vysvětlit, že tepelná energie je také uvolňována déle a toto množství stačí litinová kokily rozvést i v místech při lici formy.

Současně je ale možno posuzovat při srovnatelných podmínkách doby tuhnutí odlitku tvaru desky $200 \times 200 \times 20\text{ [mm]}$ z čistého hliníku a ze siluminu (AlSi13). Čistý hliník díky absenci dalších prvků tuhne kratší dobu než silumin. To souvisí s ukládáním nejen

atomů hliníku do uzlových poloh krystalické mřížky, ale také s ukládáním atomů přísadových prvků.

d) Pokud sledujeme experimenty při odlévání slitiny AlSi10MgMn jednoznačně z výsledků experimentů je zřejmé, že čím je větší tloušťka funkčního nástřiku líce formy, tím je delší doba tuhnutí odlitku. To je zcela zákonité, že vrstva izolačního nástřiku zvětšuje tepelný odpor na lici slévárenské formy při transportu tepla z tuhnoucího odlitku do formy. S tím také úzce souvisí hodnoty součinitele prostupu tepla β .

Z řady experimentů odlévání odlitků tvaru desky do ocelové kokily (pro tuto práci vybrané výsledky experimentů, označených I a II) není zcela patrný jednoznačný vliv nátěru na teplotu líce formy. Lze vysvětlit, že určitá tloušťka funkčního nástřiku líce formy je také překážkou při transportu tepla z tuhnoucího odlitku, což se projevuje v rychlosti ohřívání vrstev formy při jejím lici. Tím se prohřívají vrstvy formy při lici pomaleji. V relaci s tímto vysvětlením není teplota na lici u experimentu č. II.

Pokud hodnotíme experimenty s velkou tloušťkou nástřiku (experimenty č. III; IV a V). Čím je větší tloušťka funkčního nástřiku, nejen že se prodlužuje zákonitě doba tuhnutí odlitku, avšak nedochází k tak rychlému prostupu tepla do formy, a jednotlivá místa především při lici se nestačí prohřívát, neboť forma stačí teplo rozvést a ve formě se po celou dobu ustavují ploché teplotní průběhy. To lze vysvětlit tak, že se díky tlusté vrstvě funkčního nástřiku teplo sdílí z tuhnoucího odlitku do formy s malou intenzitou a v malém množství, avšak hodnota vodivosti litiny s lupínkovým grafitem a tepelná akumulace formy stačí tepla v kokile rozvést, čímž se teplota neprohřeje na vysoké teploty. Opakem tohoto procesu je např. sdílení tepla v pískové formě, která je horším vodičem i akumulátorem tepla a písková forma se prohřívá na vyšší teploty.

7. V rámci řešení této problematiky byl při následně prováděných simulačních výpočtech tuhnutí a chladnutí odlitku současně sledován vliv jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin. Pro simulační výpočty byl použit profesně sestavený program SIMTEC (RWP Aachen). Při analýze simulačních výpočtů bylo zjištěno, že největší význam na přesnost simulačních výpočtů má součinitel přestupu, resp. prostupu tepla β . Dále má velký význam součinitel tepelné vodivosti formy a součinitel měrné tepelné kapacity materiálu formy. Významné jsou i charakteristiky odlévaného materiálu – součinitel tepelné vodivosti, latentní krystalizační teplo, měrná tepelná kapacita i teplota krystalizace.

Výše uvedené poznatky potvrzují, že záměr řešení této práce se získáním hodnot součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotě při jednotlivých experimentech gravitačního lití do kokily byl správný a pro řešení těchto tepelných dějů potřebný.

Též k tomuto účelu přispívá simulační program Procast (provenience USA), který obsahuje výpočetní modul (inverse module), jež umožňuje určit hodnoty důležitých tepelných veličin použitých materiálů na základě numerických výpočtů a měření teplot.

Na základě provedených simulačních výpočtů lze konstatovat, že získané časové závislosti teplot pro jednotlivé experimenty se poměrně dobře shodují s experimentálně získanými.

8. Pokud sledujeme teplotní závislosti součinitele prostupu nebo přestupu tepla mezi kokilou při odlévání neželezných kovů, především slitin hliníku je třeba konstatovat, že dosažené výsledky obsažené v této práci zřetelně ukazují, jak plynová vrstva a nátěr (nástriek) líce formy ovlivňují tepelný přechodový odpor, resp. součinitel prostupu tepla.

Současně je nutno konstatovat, že tato problematika je ve slévárenské praxi málo řešená nebo publikovaná. Současná naléhavost řešení vyplynula z potřeby získávání tepelně-fyzikálních veličin, především součinitelů prostupu nebo přestupu tepla pro současné tepelné slévárenské výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách.

První orientační výsledky publikovali KIM a LEE [63], kteří metodou IHCP (inverse heat conducting problem) vypočítali maximální a minimální hodnotu součinitele prostupu tepla β pro odlévání hliníkových odlitků do litinové kokily průměru 60 x 60 [mm] odlitek průměru 10 x 60 [mm] při použití grafitového nátěru (TOYOCA – ACE GR – 851). Maximální hodnota je 2700 [W.m⁻².K⁻¹], minimální 1500 [W.m⁻².K⁻¹]. Současně také použili nátěr kokily (DICOTE 39 – fy FOSECO), zde byla stanovena maximální hodnota součinitele prostupu tepla 2900 [W.m⁻².K⁻¹]. Byly použity tloušťky nátěrů 0,1 [mm], bližší informace autoři neuvádí. Podobné experimenty, resp. výpočty prováděl GRITTITHS [50] se slitinou AlSi7, avšak s měděnou kokilou, chlazenou vodou i on počítal stejnou metodou součinitel prostupu tepla β . Zjistil, že se tento součinitel pohybuje od 9000 do 2500 [W.m⁻².K⁻¹]. Ani on bližší informace o prováděném výpočtu neuvádí. Také MARTORANO a CAPOCCHI [46] se zabývali zjišťováním koeficientu prostupu tepla výpočtem metodou INCP.

Uvažovali odlitek tvaru válce $\varnothing 35 \times 70$ [mm] ze slitiny Cu-8%Sn, kokila $\varnothing 55 \times 70$ [mm]; maximální hodnota součinitele prostupu tepla činí 5000 [W.m⁻².K⁻¹]. Dále na této kokile sledovali součinitel prostupu tepla v závislosti na čase, avšak kokila byla chlazená vodou. V okamžiku počátku tuhnutí odlitku tj. v čase 0 [s] vypočítali hodnotu součinitele prostupu tepla 8000 [W.m⁻².K⁻¹], v 50 [s] 3 700 [W.m⁻².K⁻¹], ve 100 [s] 2400 [W.m⁻².K⁻¹], ve 150 [s] 2000 [W.m⁻².K⁻¹], ve 200 [s] 1800 [W.m⁻².K⁻¹] a ve 250 [s] 1600 [W.m⁻².K⁻¹]. Časové relace jsou v souladu s výsledky obsaženými v mé práci. A to v tom smyslu, že těsně po nalití taveniny do formy, kdy je těsný styk taveniny a formy je velká intenzita přestupu tepla. Po určité době, kdy ztuhne vrstva odlitku, intenzita přestupu tepla klesá a v okamžiku, kdy se vytvoří vzduchová vrstva mezi ztuhlou částí odlitku a kokilou intenzita přestupu tepla klesá neboť postupně těsný styk taveniny a vliv součinitele přestupu tepla je vystřídán v důsledku vzniku vzduchové vrstvy součinitelem prostupu tepla. V důsledku toho, že nejsme schopni vystihnout hranici vlivu součinitele přestupu a prostupu tepla, v podstatě je sledován komplexní součinitel, který je označován jako součinitel prostupu tepla.

Pokud hodnotím výsledky obsažené v této práci, je nutno konstatovat, že součinitel prostupu tepla v závislosti na teplotě je veličina pro tepelné děje velmi důležitá. Bylo zjištěno, že hodnota tohoto součinitele závisí na podmínkách experimentu, tj. na teplotě předehřevu (počáteční teplotě) formy, tloušťce nátěru, charakteru nátěru (vodivý nebo izolační), teplotě lití, atd. Bylo zjištěno, že čím je nižší hodnota předehřevu formy tím je součinitel prostupu tepla vyšší. Tyto poznatky potvrzují i výsledky součinitele prostupu tepla na teplotě, které byly stanoveny při řešení této práce. Hodnotíme-li součinitel prostupu tepla v závislosti na teplotě při experimentech odlévání do litinové kokily 400 x 300 x 200 [mm] z čistého hliníku, pak z výsledků je zřejmé, že s rostoucí teplotou hodnoty součinitele prostupu tepla rostou, jak je patrné z tabulky č. 8-7 nejvyšší hodnoty součinitele prostupu tepla jsou při teplotě 800 [°C], a odpovídají hodnotě 4000 [W.m⁻².K⁻¹] při odlévání do forem o teplotě 20 [°C] bez ošetření líce ochranným nástřikem. S rostoucí teplotou předehřevu kokily hodnota součinitele prostupu tepla β klesá, jak je patrné z tabulky 8 - 7 a pro předehřev kokily na teplotu 220 [°C] již tento součinitel při teplotě 800 [°C] činí jen 3600 [W.m⁻².K⁻¹]. Opatříme-li tuto kokilu ochranným nástřikem o tloušťce 0,3 [mm] a předehřevu na cca 220 [°C] pak opět hodnota součinitele prostupu tepla klesá a při teplotě 800 [°C] je již jen cca 2700 [W.m⁻².K⁻¹] a proti neošetřené kokile je pokles hodnoty o 20 %. Podobné relace součinitele prostupu tepla lze sledovat při odlévání slitiny hliníku

AlSi13 do kokily o teplotě cca 18 [°C]. Součinitel prostupu tepla pro teplotu 700 [°C] je 3800 [W.m⁻².K⁻¹]. S rostoucí teplotou kokily hodnota tohoto součinitele opět mírně klesá (při teplotě 230 [°C] je pro teplotu 700 [°C] 3490 [W.m⁻².K⁻¹]). Při opatření kokily nátěrem opět tento součinitel je nižší a činí jen 2400 [W.m⁻².K⁻¹]. Tato hodnota je již řádově srovnatelná s hodnotami, které udává KIM a LEE [63]. Pro odlévání slitiny Al-Si eutektického složení bez nátěru líce kokily uvádí hodnotu 3800 [W.m⁻².K⁻¹], avšak ne v závislosti na teplotě. O něco vyšší hodnoty součinitele prostupu tepla byly zjištěny při odlévání čistého zinku do studené kokily. Tato hodnota činí již od teploty 500 [°C] 6000 [W.m⁻².K⁻¹]. S přehřevem kokily na cca 240 [°C] hodnota součinitele klesají na 4800 [W.m⁻².K⁻¹]. Kokila opatřená nátěrem o tloušťce 0,3 [mm] opět zvyšuje tepelný přechodový odpor a součinitel prostupu tepla činí již jen 3600 [W.m⁻².K⁻¹]. Pokud se jedná o odlévání čistého olova jsou součinitele prostupu tepla nižší než při srovnatelných podmínkách pro čistý zinek. Při odlévání do studené kokily 18 [°C] je tato hodnota 4500 [W.m⁻².K⁻¹] zahřátá kokila na teplotu 120 [°C] tento součinitel jen nepatrně snižuje na hodnotu 3800 [W.m⁻².K⁻¹]. Přehřátá kokila na teplotu 120 [°C] a opatřená nátěrem o hodnotě 0,3 [mm] opět zvyšuje tepelný přechodový odpor, což se projevuje snížením součinitele prostupu tepla na hodnoty cca 2800 [W.m⁻².K⁻¹] a hodnota se snižuje asi o 30 %

Podobné výsledky lze spatřovat i při odlévání slitiny hliníku AlSi10MgMn do ocelové kokily 220 x 220 x 220 [mm] z materiálu 19 552 přehřáté na pracovní teploty 190 až 250 [°C] a opatřené tloušťkami funkčního nástřiku o tloušťce (0,2; 0,4; 0,8; 1,2 a 2,2 [mm]). Tenké vrstvy nástřiku líce formy vedou k vyšším hodnotám součinitele prostupu tepla, např. při nástřiku 0,2 [mm] byla zjištěna maximální hodnota součinitele prostupu tepla 2950 [W.m⁻².K⁻¹], při nástřiku tloušťky 0,4 [mm] je maximální hodnota součinitele prostupu tepla 1920 [W.m⁻².K⁻¹]. Při nástřiku 0,8 [mm] již hodnota součinitele prostupu tepla nepřekračuje 1000 [W.m⁻².K⁻¹]. Při použití nástřiku 2,2 [mm] je již maximální hodnota součinitele prostupu tepla pouze 200 [W.m⁻².K⁻¹].

Ze získaných hodnot součinitele prostupu tepla β na teplotě je také zřejmé, že při nízkých teplotách (od 20 do 400 [°C]) jsou hodnoty součinitele prostupu tepla výrazně nižší a jejich hodnoty závisí na konkrétních podmínkách experimentu (odléváním materiálem, tloušťkou nástřiku líce formy, teplotě přehřevu formy atd.), jak vyplývá z tabulky 8-7 a 8-8. Z grafických závislostí je patrné, jak součinitel prostupu tepla úzce souvisí s teplotou tání příslušného odlévaného materiálu, kdy v blízkosti této teploty

hodnota součinitele prostupu tepla prudce roste (teplota tání olova 327 [°C], zinku 429 [°C], hliník 660 [°C], AlSi13 560 [°C]).

Získané teplotní závislosti součinitelů prostupu tepla jsou také v relaci s výsledky, které publikuje EXNER [41], kdy maximální hodnoty prostupu tepla (při 800 [°C]) při odlévání do litinové kokily bez jejího ošetření líce jsou 4000 [W.m⁻².K⁻¹] pro čistý hliník, 4000 [W.m⁻².K⁻¹] pro slitinu AlSi13 a 8000 [W.m⁻².K⁻¹] pro čistý zinek.

Pokud sledujeme hodnoty součinitele prostupu tepla při experimentech s použitím základních nástřiků o tloušťce 0,2 a 0,4 [mm], lze konstatovat, že maximální hodnoty příslušných součinitelů jsou nižší a činí 2600 a 1100 [W.m⁻².K⁻¹].

Závěrem bych chtěl poznamenat, že práce byly vypracována na základě získaných poznatků v této problematice nejen při studiu na katedře strojírenské technologie, oddělení strojírenská metalurgie TU Liberec, ale také při studijním pobytu na Technické univerzitě v portugalské Universidade do Minho, Guimaraes.

10. ZÁVĚR

Předložená doktorská práce je zpracována na téma: „*Tepelné poměry mezi odlitkem a kokilou při gravitačním liti*“. Je příspěvkem ke sledování tepelných dějů v kokilách při odlévání slitin neželezných kovů, především slitin hliníku, které jsou dnes velmi používané v automobilovém průmyslu při výrobě funkčně velmi náročných odlitků jako jsou např. hlavy bloků nebo písty spalovacích motorů.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí, rešeršní a experimentální.

V rešeršní části práce je proveden rozbor tepelných dějů v systému odlitek – mezera – forma. Vedle tepelných dějů sdílení tepla na povrchu a ve slévárenské formě je velká pozornost věnována mezeře, která vytváří tepelný přechodový odpor a výrazným způsobem ovlivňuje průběh tepelných dějů mezi odlitkem a kovovou formou i kvalitu případně prováděných simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitků. Vedle charakteristiky možných výpočtových metod řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla v trojrozměrném prostoru je provedeno její rozpracování pro řešení metodou konečných prvků. Velká pozornost je také věnována charakteristice tepelně fyzikálních veličin jak materiálu formy a odlitku, tak samotným kovovým formám včetně nátěrů nebo nástřiků jejich líce.

5. Při provádění vlastních experimentů odlévání, bylo dbáno na dodržování pokud možno stejných podmínek.
6. Použitá verze simulačního programu SIMTEC zahrnuje do výpočtu plnění slévárenské formy i vlivy tepelného přechodového odporu, resp. teplotní závislost součinitele prostupu, nebo přestupu tepla mezerou, ale i teplotní závislost ostatních potřebných tepelně fyzikálních veličin. Současně databanka tohoto simulačního programu obsahuje tyto veličiny.
7. Na základě prováděných simulačních výpočtů byla zjištěna důležitost jednotlivých tepelně fyzikálních veličin v závislosti na teplotě na kvalitu prováděných simulačních výpočtů. Nejdůležitější je součinitel prostupu tepla β , dále součinitel tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity materiálu formy, latentní teplo, součinitel tepelné vodivosti odlévaného materiálu a ostatní veličiny odlévaného materiálu.
8. Stanovené hodnoty součinitele β v závislosti na teplotě pro jednotlivé experimenty, které jsou v tabulce 8-7, odpovídají podmínkám prostupu tepla v systému odlitek - mezera - forma. Při teplotách (např. 700 až 800 [°C]), které jsou vyšší než teploty tání použitých materiálů, je tavenina v těsném styku s formou, což odpovídá poměrně vysoké hodnotě β , především je-li forma bez nátěru. Tak např. při teplotě 800 [°C] jsou součinitele prostupu tepla: pro čistý hliník 4000 [W.m⁻².K⁻¹]; pro AlSi13 3850 [W.m⁻².K⁻¹]; pro čistý zinek 6000 [W.m⁻².K⁻¹]; pro čisté olovo 4300 [W.m⁻².K⁻¹]. S tloušťkou nátěru a s rostoucí teplotou přehřevu formy součinitele klesají (viz tabulka 8-8). Teplotní závislost hodnot součinitele prostupu tepla je spojena s teplotou tání odlévaného kovu. Do teploty tání jsou nižší hodnoty nad teplotou tání příslušného slévárenského materiálu jsou hodnoty podstatně vyšší.
9. Naměřené hodnoty smrštění odlitku při jeho tunutí závisí na odlévaném materiálu i podmínkách prováděných experimentů. Bylo zjištěno, že tyto hodnoty jsou od 0,1 do 0,3 [mm].

Vlastní přínos práce

Práce shrnuje a rozšiřuje poznatky o tepelných dějích v kovových formách při gravitačním lití za vzniku plynové vrstvy a současně ukazuje nejen vliv jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin na kvalitu popisu sdílení tepla mezi odlitkem a kovovou formou, ale i celého tepelného procesu, včetně tuhnutí a chladnutí odlitku.

Byla stanovena vlastní metodika provádění experimentů s využitím moderní výpočetní techniky pro měření časových závislostí teplot nebo pro sledování smršťování odlitku se zjištěním velikosti vzduchové vrstvy, která se podílí na vzniku tepelného přechodového odporu mezi odlitkem a formou.

Současně je v práci naznačen tepelný výpočet s využitím Fourierovy diferenciální rovnice sdílení tepla rozpracované na numerickou metodu konečných prvků.

Pro praktické použití mohou být přínosné stanovené závislosti součinitele prostupu tepla na teplotě při odlévání vybraných slévárenských materiálů. Doposud se součinitel prostupu nebo přestupu tepla při tepelných slévárenských výpočtech uvažoval pouze jako konstantní veličina, což snižovalo přesnost tepelných výpočtů. Teprve v poslední době se začala této veličině přikládat značná vážnost. To je v souladu s neustálým rozvojem výpočtových simulačních programů, zpřesňování a doplňování materiálových databází vyvíjejících se programů.

Předložená práce představuje řadu teplotních závislostí součinitele prostupu tepla pro používané materiály forem, jak s nástřikem, tak i bez nástřiku, pro gravitační lití i používané slitiny, především AlSi10MgMn i AlSi13 . Uvedené závislosti tohoto součinitele jsou v současné době velmi potřebné pro úspěšné simulační výpočty při tuhnutí a chladnutí odlitků, především v automobilovém průmyslu.

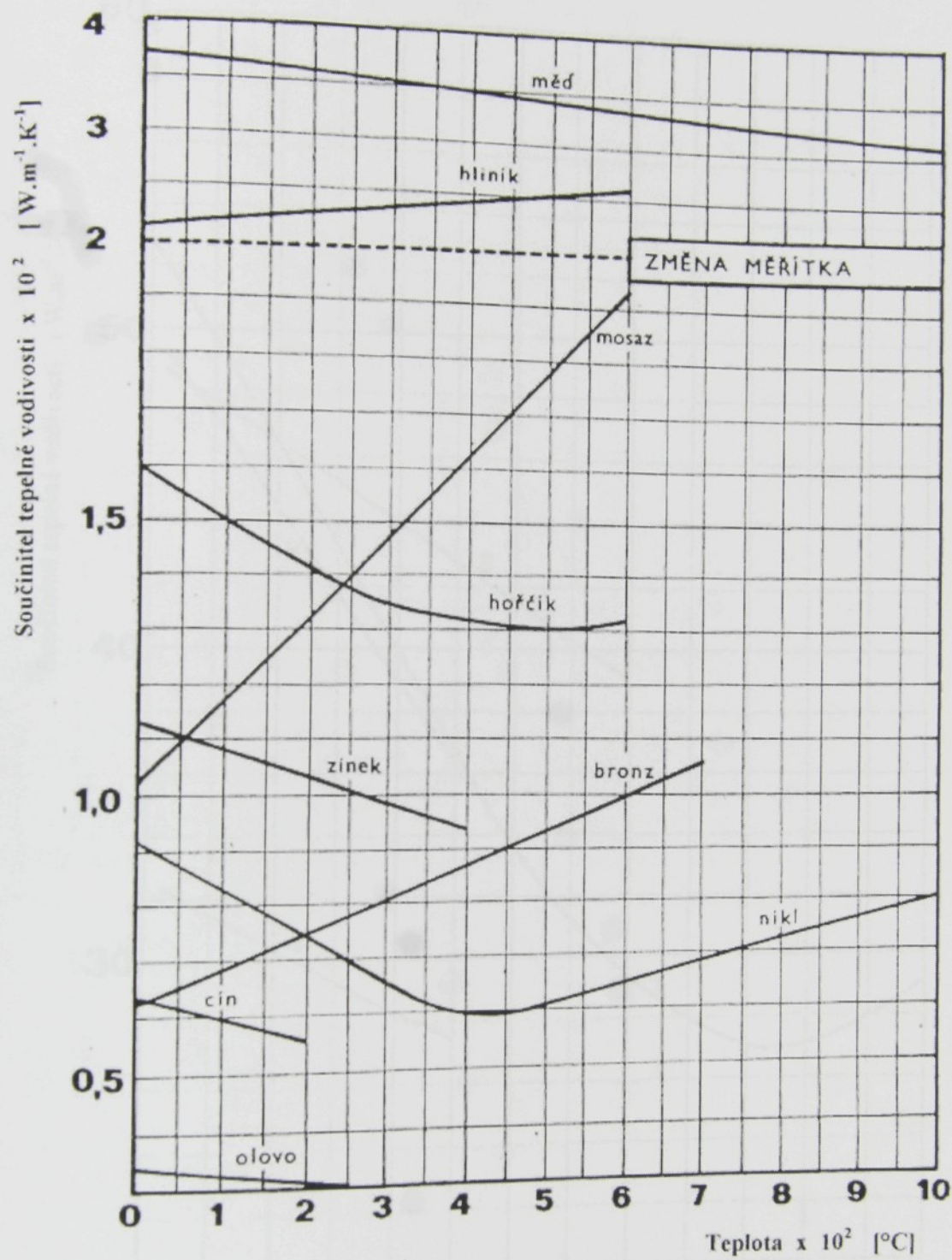
Předložené výsledky experimentů a následně provedených simulačních výpočtů ukazují určitou shodu a tím potvrzují velký význam stanovených závislostí prostupu tepla na teplotě. Současně se ukazuje myšlenka získání součinitele prostupu tepla mezery jako několikavrstvého systému prostřednictvím zpětné simulace v současné době jako velmi příznivá.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

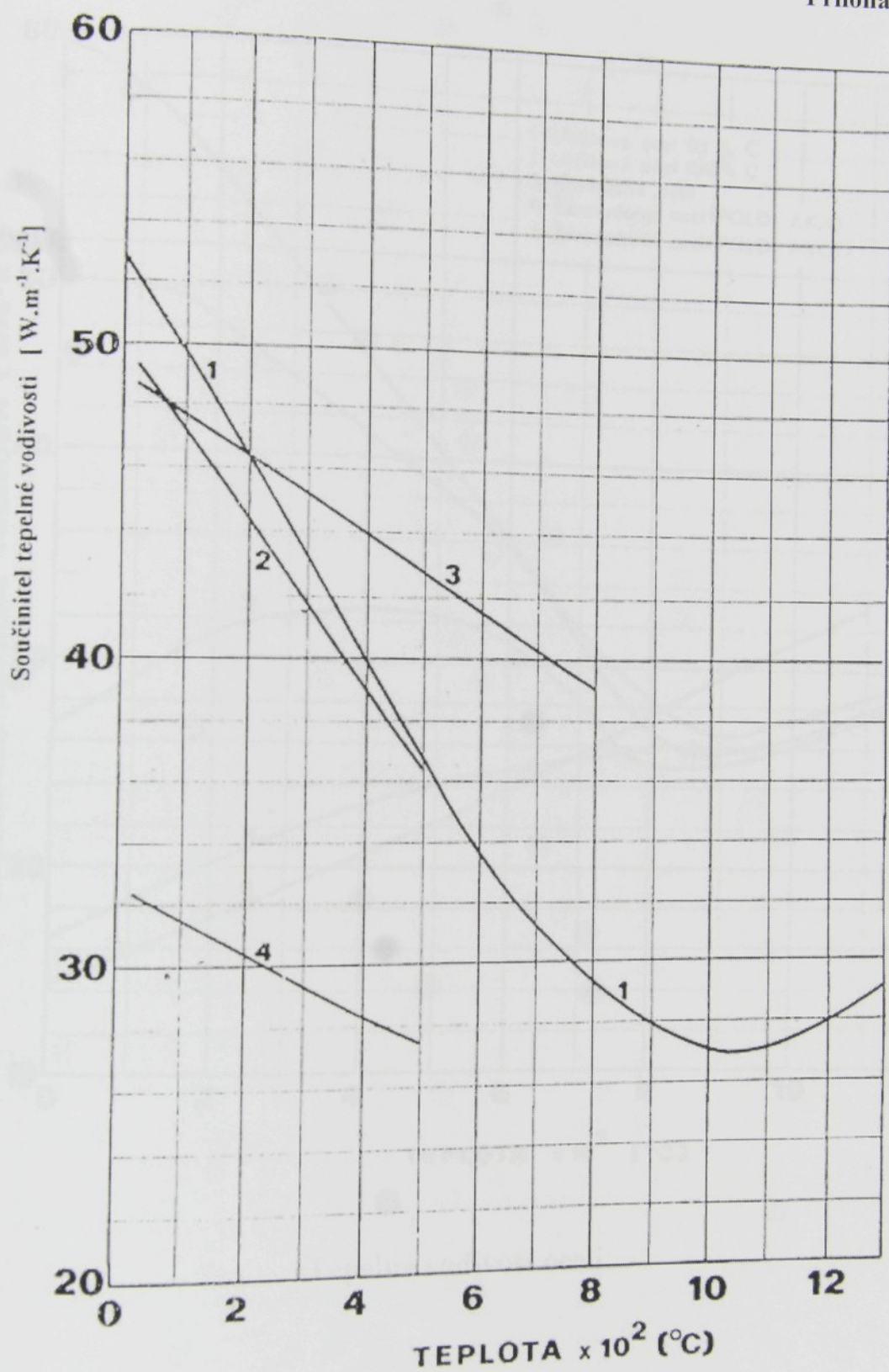
- [1] SCHWARTZ, C.: Die rechnerische Behandlung der Abkühlungs und Erstarrungsvorgänge bei Flüssigen Metall. Archiv für das Eisenhüttenwesen 5, 1931, s.139.
- [2] CHVORINOV, N.: Tuhnutí a krystalizace oceli. 1. vyd., Praha 1954
- [3] CHVORINOV, N.: Theorie der Erstarrung von Gusstücken. Die Giesserei 27, 1940, s.177, 201, 222.
- [4] GIRŠOVIČ, N.G.: Stalnoje litje. 1. vyd., Moskva – Leningrad Metallurgizdat, 1948.
- [5] VEJNIK, A, I.: Približenyj rasčet processov teploprovodnosti. 1. vyd., Moskva, 1959.
- [6] VEJNIK, A, I.: Torija zatverdevanija otlivki. 1. vyd., Moskva 1960.
- [7] VEJNIK, A, I.: Termodinamika litejnoj formy. 1. vyd., Moskva 1968.
- [8] VEJNIK, A, I.: Kokil. 1. vyd., Minsk 1972.
- [9] ANISOVIČ, G.A.: Vlijanije različnych faktorov na process zatverdevanija otlivki. In: Problemy teploobmena pri litje. Moskva 1960, s. 21 až 35
- [10] NECHENZI, J. A.: Propriété de fonderie des alliages. Fondrie 271, 1968.
- [11] HAVLÍČEK, F.: Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy. Ostrava, VŠB, 1970.
- [12] PŘIBYL, J.: Řízené tuhnutí ocelových odlitků. 1. vyd., Praha 1986.
- [13] WLODAWER, R.: Die gelenkte Erstarrung von Stahlguss. 2. vyd., Düsseldorf, Giesserei – Verlag GmbH 1967.
- [14] ANISOVIČ, G.A.: Vlijanije različnych faktorov na process zatverdevanija otlivki. In: Problemy teploobmena pri litje. Moskva 1960, s. 21 až 35.
- [15] JELÍNEK, P.: Tepelná vodivost formovacích směsí používaných při výrobě forem a jader masivních ocelových odlitků. Slévárnictví XXXVII, 1982, č.8, s.325 až 331.
- [16] RUDDLE, R, W.: The solidification of castings. [Ruský překlad Zatvrděvanije otlivok]. 1. vyd., Moskva 1960.
- [17] VETÍŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 1. vyd., Praha 1974.
- [18] CARSLAW, H. W., JAEGER, J.C.: Conduction of heat in solids (Těploprovodnost' tvjordych těl - překlad do ruského jazyka). 1. vyd., Moskva 1960.
- [19] LIGHTFOOT, M. H.: Fourth report of the committee on Heterogenity of Steel ingots, Iron Steel Inst. Soec. rep. No 2, 1939, s. 162.
- [20] BERRY, J., KONDIC, V., MARTIN, G.: Solidification times of siple shaped castings in sand moulds. Trans. AFS, 67, 1959, s. 449.
- [21] GIRŠOVIČ, N.G., NECHENDZI, J.A.: Novoje v tēorii i praktike litějnogo proizvodstva. 1. vyd. Moskva 1956.
- [22] GOODMAN, T.R.: Aplication of integral methods to transient noulinear heat transfer advances in heat transfer ad by. Vol. 1 Academic Press New York.
- [23] FISCHER, G.A.: General Electric ompany, Internal Report.
- [24] THYBERG, B.: Wärmeinträgnung in den form. Giesserei 1966, č.9 s. 13.
- [25] HAVLÍČEK, F.: Tepelně-fyzikální pochody mezi ingotem a kokilou. [Hutnické aktuality]. Roč. 10, č.1, VÚHŽ Praha, 1969.
- [26] HLOUŠEK, J. PATOČKA, Z.: Aplikovaná termomechanika. [Skripta]. VUT – FS Brno 1973.

- [27] HLOUŠEK, J., RŮŽIČKA, D., KAVIČKA, F.: Výpočet termokinetiky krystalizace válcového vzorku z čistého hliníku. *Kovové materiály* 15, 1977, č.2, s. 167 až 185.
- [28] HLOUŠEK, J., KAVIČKA, F.: Analytické a numerické řešení teplotního pole odlitku. *Slévárnictví XXXVII* 1989, č. 10, s. 422.
- [29] RUSÍN, K.: Teorie slévárenských pochodů. [Skripta]. VUT Brno 1981.
- [30] WEISS, K.: Die Berechnung des Wärmeüberganges zwischen Phasengrenzen mittels der Methode der inneren Ränder. RWP Aachen 1995.
- [31] FLETSCHER, A.J.: Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment. 1. vyd., Elsevier Applied Science London / New York 1989. ISBN 1 – 85166 – 245 – 6.
- [32] NOVÁ, I.: Měření teplotních polí a sledování hodnot termofyzikálních vlastností litinových slévárenských forem. [Habilitační práce] VŠST – FS Liberec 1994.
- [33] KAVIČKA, F.: Termokinetika tuhnutí. [Skripta]. VUT – FS Brno, 1993.
- [34] MICHEJEV, M.A.: Základy sdílení tepla. 1. vyd. Praha 1953.
- [35] GRÖBER, H., ERK, S., GRIGULL, V.: Die Grundsetze der Wärmeübertragung. 1.vyd., Berlin 1955.
- [36] ŠORIN, S.N.: Sdílení tepla. 1. vyd. Praha 1968.
- [37] OETERS, F., DRÖMER, H.C.: Wärmeleitung in Gußkörpern . In: Erstarung metallischer Schmelzen. Deutsche Gesellschaft für Metalkunde 1981.
- [38] VALCHÁŘOVÁ, J.: Soudobé numerické metody v mechanice kontinua. 1. vyd., Praha 1986.
- [39] JURA, S. a kol.: Transfer Developmet and Application of Simulation Techniques for permanent Mould in Al – Casting. [Program Copernicus], TU Gliwice, Oktober 1996.
- [40] BATHE, K.J.: Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 1982.
- [41] EXNER, J., NOVÁ, I.: Influence of Thermal Resistance Coefficient of Gap in the Casting Metal Mould System. In: Polish acedemy of Sciences Department Katowice. Foundry Commission.
- [42] MAZÁNKOVÁ, M. Heat balance and temperature field of the system: casting–mould surroundings. In: *Metallurgy*. Vol. 40, Issue 1, January 2001, p. 57 – 60.
- [43] FACKELDEY, M., LUDWIG, A., SAHM, P.R.: Coupled modelling of the solidification process predicting temperatures stresses and microstructures. In: *Computational Materials Science* 7 (1996) p. 194 – 199.
- [44] HANOUSEK, J., CHARAMZA, P.: Moderní metody zpracování dat – matematická statistika pro každého. 1. vyd. Praha 1992.
- [45] SANTOS, C.A., QUARESMA, J.M., GARCIA, A.: Determination of transient interfacial heat transfes coefficients in chill mould castings. *Journal of Alloys and Compounds* Vol. 319, Issues 1-2 April 2001 p. 174 – 186.
- [46] MARTORANO, M.A., CAPOCCHI, J.D.T.: Heat transfer coefficient at the mould-mould interface in the unidirectional solidification of Cu – 8% Sn alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 2000, p. 2541-2552.
- [47] NOVÁ, I.: Simulační programy tuhnutí a chladnutí odlitků. *Slévárenská ročenka* 2002, s. 123 – 133.
- [48] MOCHNACKI, B., SUCHY, J.S.: Numerical methods in Computations of Foundry processes, Polish Foundrymen's Technical Association, Krakow 1995.
- [49] KUNEŠ, J.: Modelování tepelných procesů. 1. vyd., Praha 1989.

- [50] GRITTITHS, W.D.: The Heat- Transfer Coefficient during the Unidirectional Solidification of an Al-Si Alloy casting. In: Metallurgical and Materials Transformation vol 30B. Issue 3, p. 473 – 482 Material Science Centre.
- [51] FEACKELDEY, M., LUDWIG, A., SAHN, P.R.: Coupled Modeling of the Solidification process predicting temperatures stresses and microstructures. In: Computational Materials Science 7 (1996) p. 194 – 199.
- [52] TROVANTI, M., ARCYROPOULOS, S.A.: Estimation of Boundary Conditions for the Modeling of Material Casting. In: Light Metals Proceeding of Sessions, TMS Annual Meeting (Warrendale, Pennsylvania) p. 1005 – 1010. ISSN 0147-0809.
- [53] LEWIS, R.W., RANSING, R.S.: A Correction to Describe interfacial Heat Transfer during Solidification Simulation and its use in the Optimal Feeding Design of Castings. In: Metallurgical and Materials Transaction B Vol. 29 B, Iss. 2 April 1998, p. 437 – 448.
- [54] BATHE, K.J.: Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 1982
- [55] STOLZ, G.J.: Numerical solutions to an inverse problem of heat conduction for simply shapes. ASME Journal Heat Transfer, 82, 1960, s. 20 – 26.
- [56] BECK, J.V., BLACKWELL, C.R., CLAIR, J.: Inverse Heat Conduction. 1st ed., Wiley New York, 1985, p. 119.
- [57] JORSTAD, J.L.: Metallurgische Hinweise zum Konstruieren von Aluminiumdruckgussteilen und ihren Formen Giesserei praxis, Nr. 15/16, 1988, s.208 – 214.
- [58] PÍŠEK, F. aj.: Nauka o materiálu. I/3 (Neželezné kovy). Druhé, rozšířené a zcela přepracované vydání. Praha 1973.
- [59] ČABELKA, J. a kol.: Mechanická technológia. 1. vyd. Praha / Bratislava 1967.
- [60] EXNER, J., NOVÁ, I.: Vývoj metod pro hospodárnou výrobu zdravých odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí.[Podklady pro řešení grantového úkolu GAČR 106/95/0472; hlavní řešitel VU Brno]. TU – FS, KSM Liberec 1996.
- [61] EXNER, J., NOVÁ, I.: Rozvoj a aplikace simulační techniky pro odlévání hliníkových slitin [Podklady pro řešení grantového projektu CIPA – CT 94 0125 - COPERNICUS], TU - FS, KSM Liberec 1997.
- [62] EXNER, J., NOVÁ, I.: Predikce struktury a užitných vlastností odlitků pomocí simulačních programů.[Podklady pro řešení grantového úkolu GAČR 106/99/00091; hlavní řešitel VU Brno]. TU – FS, KSM Liberec 2001.
- [63] BAŘINOVÁ, D.: Simulační výpočet tuhnutí hliníkových hlav motorů. [Studie gravitačního lití]. Autoškoda Mladá Boleslav 2001.
- [64] KIM, T.G., LEE, Z.H.: Time – varying heat transfer coefficients between tube-shaped casting and metal mould. Heat Mass Transfer vol. 40, No 15 p. 3513 – 3525.
- [65] PÍŠEK, F., PLEŠINGER, A. a kol.: Slévárnictví I (Obecná část), 1. vyd., Praha 1974.
- [66] VEJNIK, A.I.: Teploobmen između slitkom i izložnicej. 1. vyd., Metallurgizdat Moskva 1959.
- [67] KOLEKTIV: Příručka o hliníku 1. vyd., Praha 1969.
- [68] GRÍGEROVÁ, T., KOŘENÝ, R., LUKÁČ, I.: Zlívárnictvo neželezných kovov. vyd., Praha 1988.
- [69] MACÁŠEK, I., RUSÍN, K., VETIŠKA, A.: Slévárnictví II. 1. vyd., Praha 1978
- [70] HAVLÍČEK, F.: Tepelně-fyzikální pochody mezi ingotem a kokilou. [Hutnické aktuality], roč. 10,



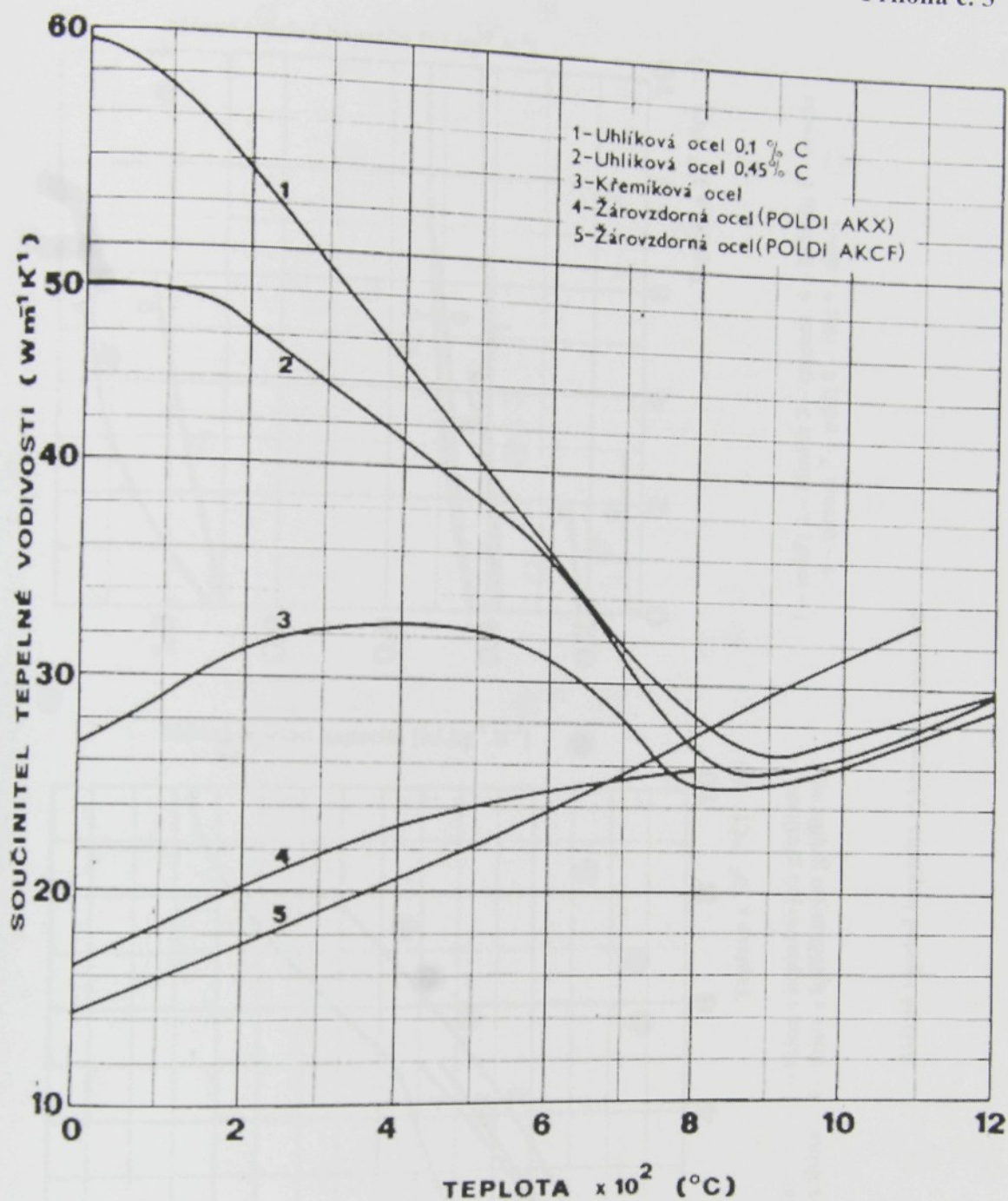
Tepelná vodivost neželezných kovů a slitin



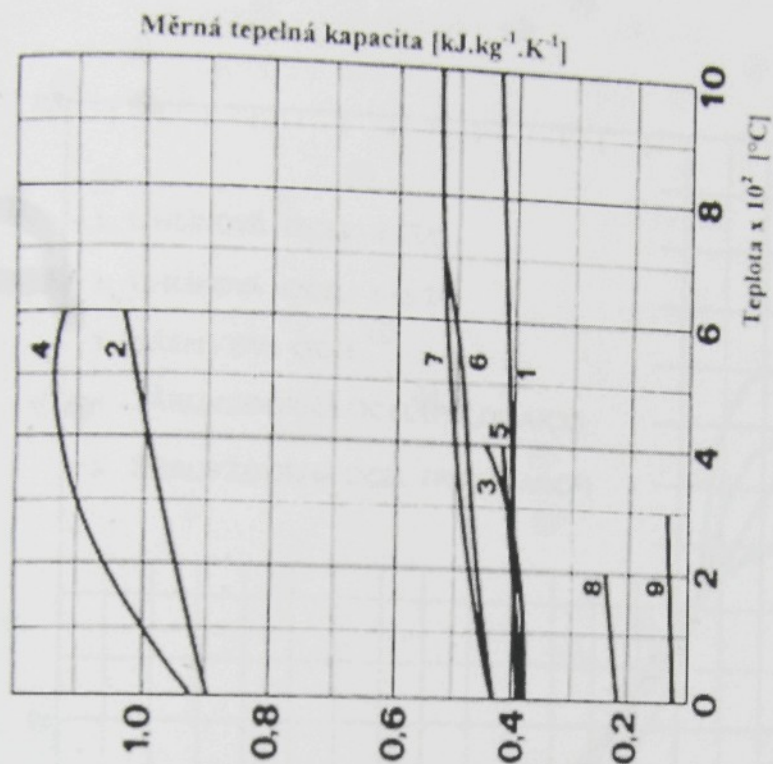
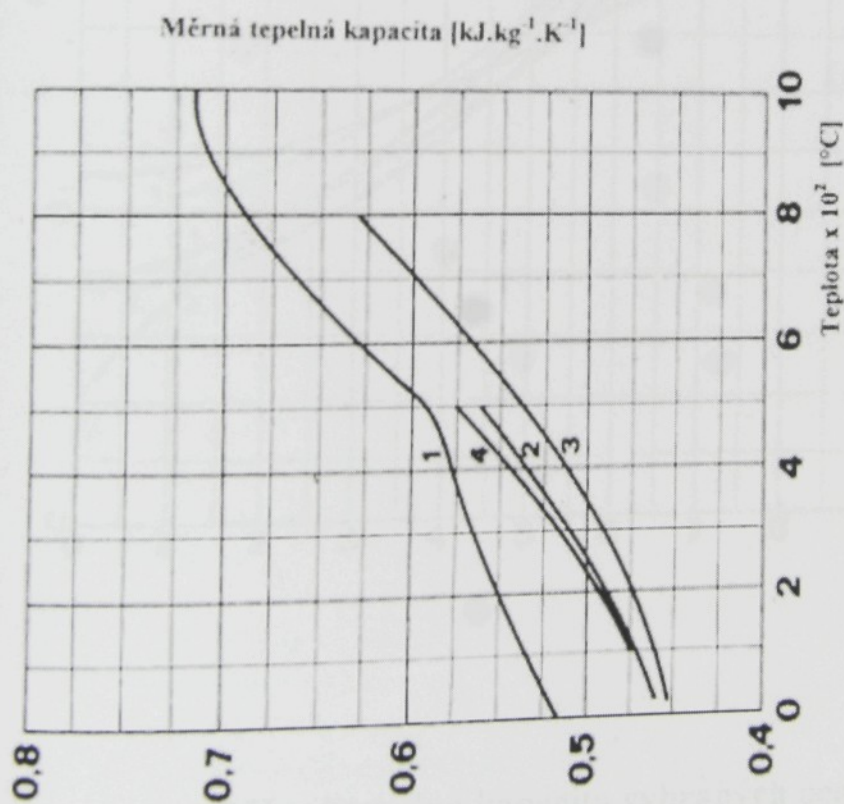
1 – surové železo;
3 – temperovaná litina

2 – litina s lupínkovým grafitem;
4 – litina s kuličkovým grafitem;

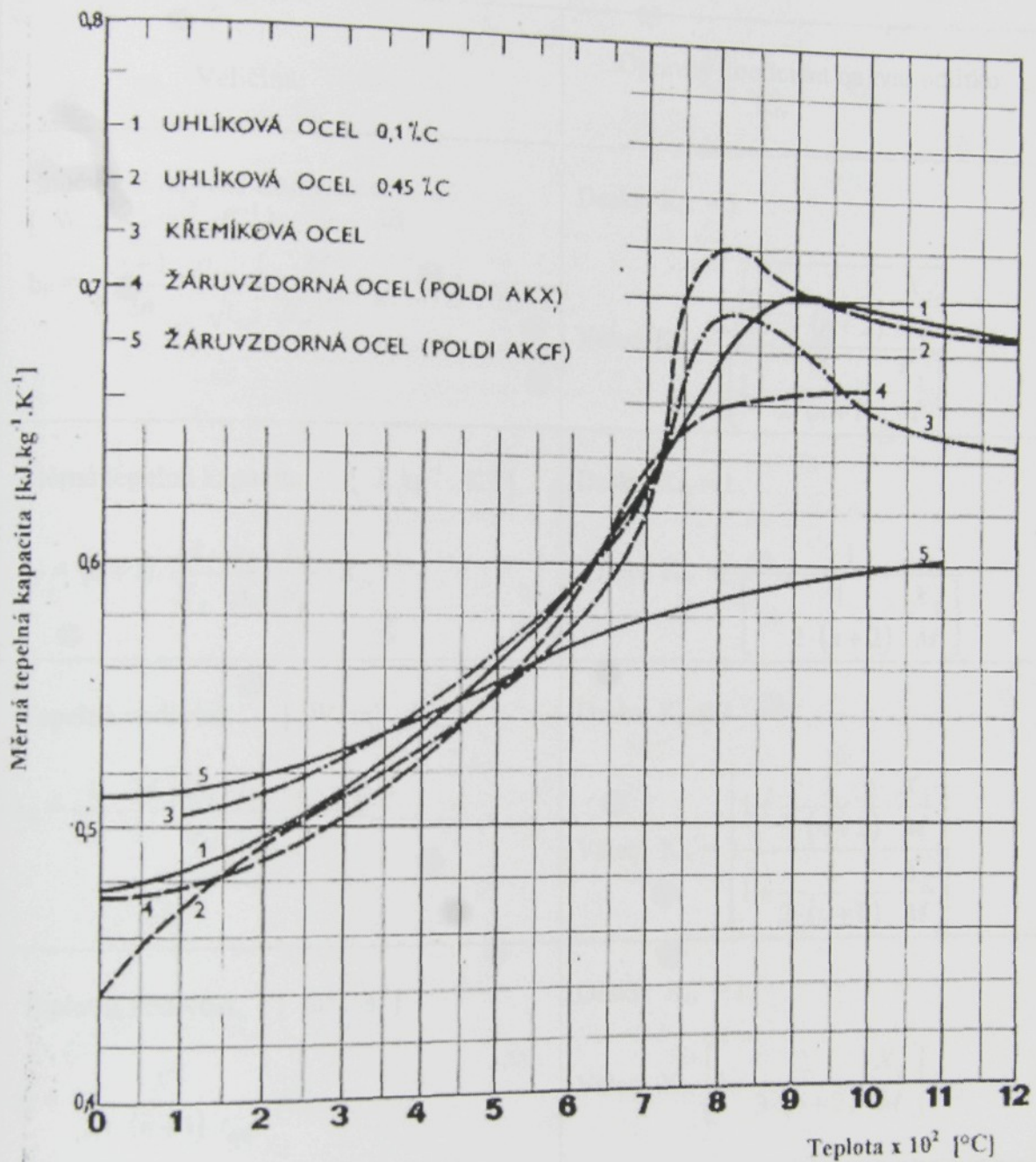
Tepelná vodivost surového železa a litin



Tepelná vodivost ocelí



Měrná tepelná kapacita vybraných materiálů



Měrná tepelná kapacita vybraných ocelí

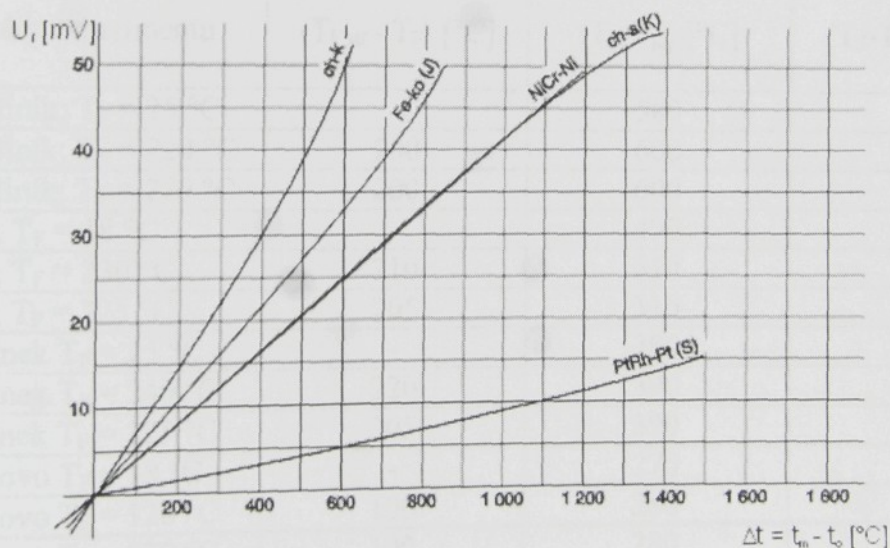
Vztahy pro výpočet tepelně-fyzikálních veličin podle VEJNIKA [6]

Veličina:	Opravný koeficient na tvar odlitku K_{tv}
Součinitel tepelné akumulace [W. s^{1/2} . m⁻² . K⁻¹] $b_F = \sqrt{\frac{n+1}{2n}} \cdot \frac{\rho_M \cdot L_C \cdot M}{\sqrt{t_{tuh}} \cdot \theta_{ef}} \cdot K_{tv}$	Deska: $K_{tv} = 1$ $\text{Válec: } K_{tv} = \frac{\sqrt{1 + \frac{2}{3 \cdot (n+2)} \cdot \frac{X_2}{M}}}{\left[1 + \frac{1}{2 \cdot (n+1)} \cdot \frac{X_2}{M} \right]}$
Měrná tepelná kapacita [J. kg⁻¹ . K⁻¹] $c_F = (n+1) \cdot \frac{M \cdot \rho_M \cdot L_C}{X_2 \cdot \rho_F \cdot \theta_{ef}} \cdot K_{tv}$	Deska: $K_{tv} = 1$ $\text{Válec: } K_{tv} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{2 \cdot (n+2)} \cdot \frac{X_2}{M} \right]}$
Tepelná vodivost [W. m⁻¹ . K⁻¹] $\lambda_F = \frac{1}{2n} \cdot \frac{M \cdot X_2 \cdot \rho_M \cdot L_C}{\theta_{ef} \cdot t_{tuh}} \cdot K_{tv}$	Deska: $K_{tv} = 1$ $\text{Válec: } K_{tv} = \frac{\left[1 + \frac{2}{3 \cdot (n+2)} \cdot \frac{X_2}{M} \right]}{\left[1 + \frac{1}{2 \cdot (n+2)} \cdot \frac{X_2}{M} \right]}$
Teplotní vodivost [m² . s⁻¹] $a_F = \frac{X_2^2}{2n \cdot (n+1) \cdot t_{tuh}} \cdot K_{tv}$	Deska: $K_{tv} = 1$ $\text{Válec: } K_{tv} \left[1 + \frac{2}{3 \cdot (n+2)} \cdot \frac{X_2}{M} \right]$

Poznámka: n – stupeň paraboly [1]
M – modul odlitku [m]
 ρ_M – hustota taveniny [kg.m⁻³]
 L_C – celkové krystalizační teplo [J.kg⁻¹]
 t_{tuh} – celkový čas tuhnutí odlitku [s]
 θ_{ef} – efektivní teplota [°C]; $\theta_{ef} = T_{KR} - T_F$
 X_2 – tloušťku prohřáté vrstvy [m].

Mezinárodní značení termočlánků dle IEC 584

Označení termočlánku dle IEC 584	Původní označení	Měřicí rozsah [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	-250 až 350
J	Fe-CuNi	-200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	-100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	-200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	-200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700
Označení termočlánku dle IEC 584	Původní označení	Měřicí rozsah [°C]
L	Fe-CuNi, Fe-ko	-200 až 900
U	Cu-Ni, Cu-ko	-200 až 600



Hodnoty součinitelů lineárního smrštění vybraných materiálů [10]

Materiál		Součinitel lineární roztažnosti α^* [K ⁻¹]
Litina s lupínkovým grafitem	20 - 100 °C	9,5.10 ⁻⁶
	20 - 200 °C	12.10 ⁻⁶
	200 - 300 °C	15,2.10 ⁻⁶
	500 - 600 °C	15,7.10 ⁻⁶
	800 - 900 °C	32.10 ⁻⁶
Hliník	20 - 100 °C	22,4.10 ⁻⁶
Slitiny hliníku	20 - 100 °C	22 .10 ⁻⁶
Olovo	20 - 100 °C	29,3.10 ⁻⁶
Zinek	20 – 100 °C	29,2.10 ⁻⁶
Mosaz (Cu62Zn38)	20 – 100 °C	18,4.10 ⁻⁶
Ocel (0,6%C)	20 - 100 °C	11.10 ⁻⁶

Hodnoty teplot potřebných k výpočtům smrštění

	Podmínky experimentu	(T _{F stř} - T _F) [°C]	(T _S -T _K) [°C]	(T _S -T _{O stř}) [°C]
1.	Čistý hliník; T _F = 25 °C	-	580	250
2.	Čistý hliník; T _F = 220 °C	200	600	350
3.	Čistý hliník; T _F = 220 °C	200	600	350
4.	AlSi13; T _F = 18 °C	-	490	250
5.	AlSi13; T _F = 230 °C	210	510	350
6.	AlSi13; T _F = 225 °C	205	510	350
7.	Čistý zinek T _F = 25 °C	-	380	200
8.	Čistý zinek T _F = 240 °C	220	390	245
9.	Čistý zinek T _F = 225 °C	205	390	245
10.	Čisté olovo T _F = 18 °C	-	270	150
11.	Čisté olovo T _F = 120 °C	100	280	150
12.	Čisté olovo T _F = 120 °C	100	280	150
13.	AlSi9Cu3; T _F = 250 °C	230	520	350
14.	AlSi9Cu3; T _F = 190 °C	170	510	350
15.	AlSi9Cu3; T _F = 195 °C	175	510	350
16.	AlSi9Cu3; T _F = 190 °C	170	510	350
17.	AlSi9Cu3; T _F = 200 °C	180	510	350

Poznámka: Stanoveno na základě poznatků VEJNIKA [7]

Příloha č. 9

Hodnoty vybraných veličin použitých slévárenských slitin [58], [67]

Veličina	Čistý hliník	Slitina AlSi13	Čistý zinek	Čisté olovo
Teplota tání [°C]	660	577* 560**	419	327
Hustota taveniny [kg.m ⁻³]	2 380	2 520	6 700	10 300
Měrná tepelná kapacita taveniny při T _{tání} [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1 289,5	10131,0	502,0	113,0
Latentní krystalizační teplo [J.kg ⁻¹]	391 600	401 900	112 000	24 000
Tepelná roztažnost [K ⁻¹]	23,86.10 ⁻⁶	-	63,9.10 ⁻⁶	29,310 ⁻⁶
Hustota [kg.m ⁻³] při 25 °C	2 700	2 555	7 140	11 340
330 °C	2 680	2 542	-	10 300
500 °C	2 670	2 535	6 700	10 050
Tepelná vodivost při 25 °C [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	209	165	112	35
330 °C	220	152	100	29
500 °C	235	139	90	26
Měrná tepelná.kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] při 25 °C	896	1 089	410	131
330 °C	1 010	1 110	-	150
500 °C	1 030	1 121	480	-
Teplotní vodivost při 25 °C [m ² .s ⁻¹]	8,64.10 ⁻⁵	5,93.10 ⁻⁵	3,72.10 ⁻⁵	2,14.10 ⁻⁵
330 °C	8,12.10 ⁻⁵	5,39.10 ⁻⁵	3,42.10 ⁻⁵	1,88.10 ⁻⁵
500 °C	8,54.10 ⁻⁵	4,90.10 ⁻⁵	2,98.10 ⁻⁵	-
Lineární smrštění mezi T _{tání} až 20 °C [%]	1,8	1,6	1,3	0,7

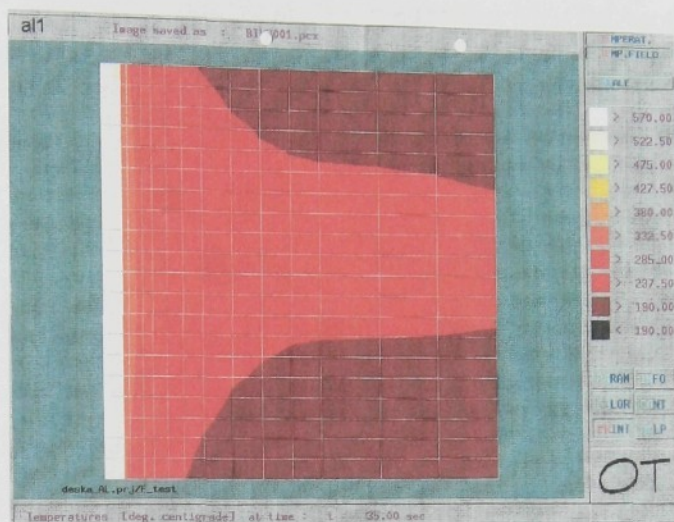
Poznámka: Lineární smrštění vyjadřuje délkovou změnu při poklesu teploty z teploty solidu do teploty 20 °C.

Hodnoty vybraných veličin slitin hliníku AlSi10MgMn [67]

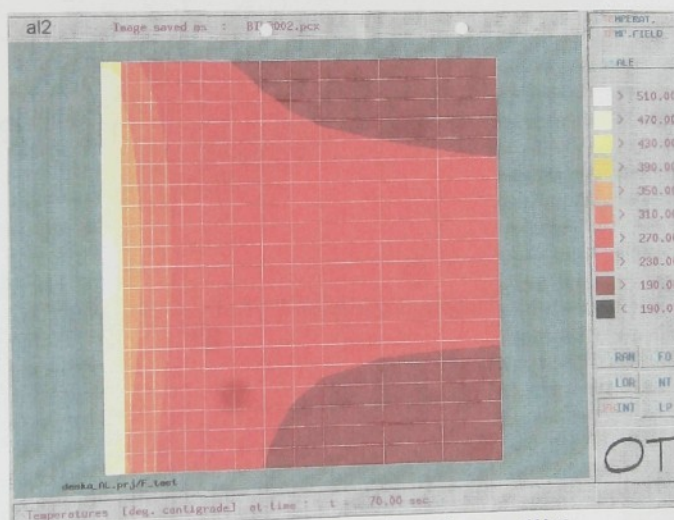
Veličina	Slitina AlSi10MgMn
Teplota tání [°C]	601
	575
Hustota taveniny [kg.m ⁻³]	2600
Měrná tepelná kapacita taveniny při T _{tání} [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1070,0
Latentní krystalizační teplo [J.kg ⁻¹]	472 121
Tepelná roztažnost [K ⁻¹]	-
Hustota [kg.m ⁻³] při 25 °C	2650
330 °C	2630
500 °C	2605
Tepelná vodivost při 25 °C	185
[W.m ⁻¹ .K ⁻¹] 330 °C	160
500 °C	135
Měrná tepelná.kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] při 25 °C	1015
330 °C	1040
500 °C	1075
Teplotní vodivost při 25 °C	-
[m ² .s ⁻¹] 330 °C	-
500 °C	-
Lineární smrštění mezi T _{tání} až 20 °C [%]	0,4 až 0,7 [69]

Poznámka: Lineární smrštění vyjadřuje délkovou změnu při poklesu teploty z teploty solidu do teploty 20 °C.

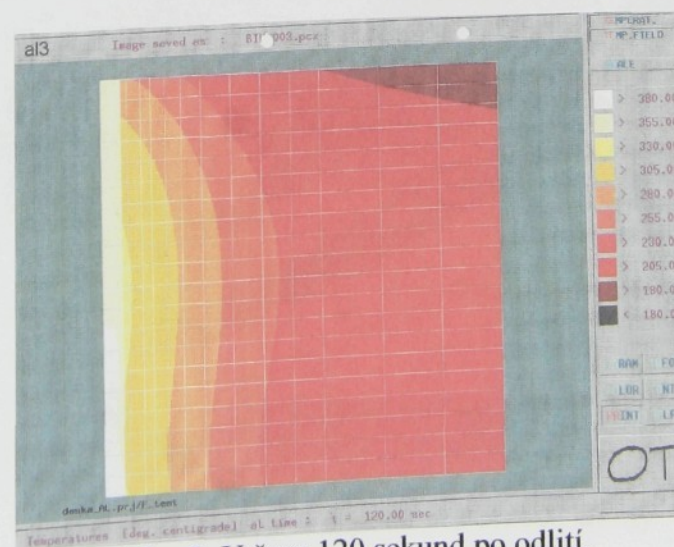
Vzhledem k symetrii odlitku, kokily i vnějšího prostředí je dostačující simulace pouze jedné poloviny soustavy.



Obr. 1: V čase 35 sekund po odlití.



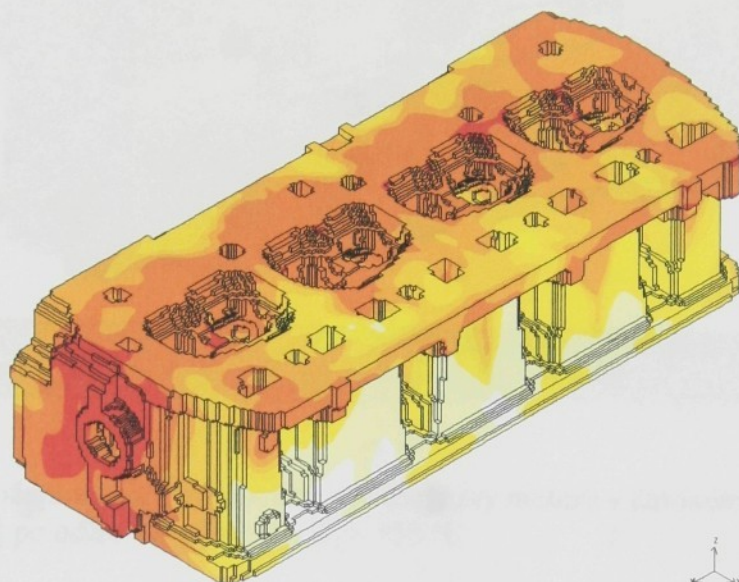
Obr. 2: V čase 70 sekund po odlití.



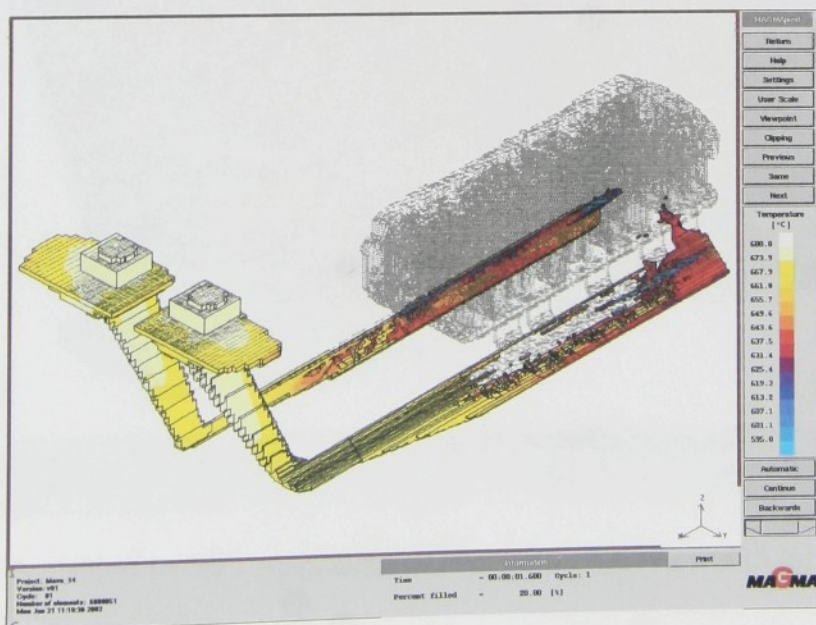
Obr. 3: V čase 120 sekund po odlití.

Simulační výpočet hlavy válců spalovacího motoru (gravitační kokilové lití) [63]

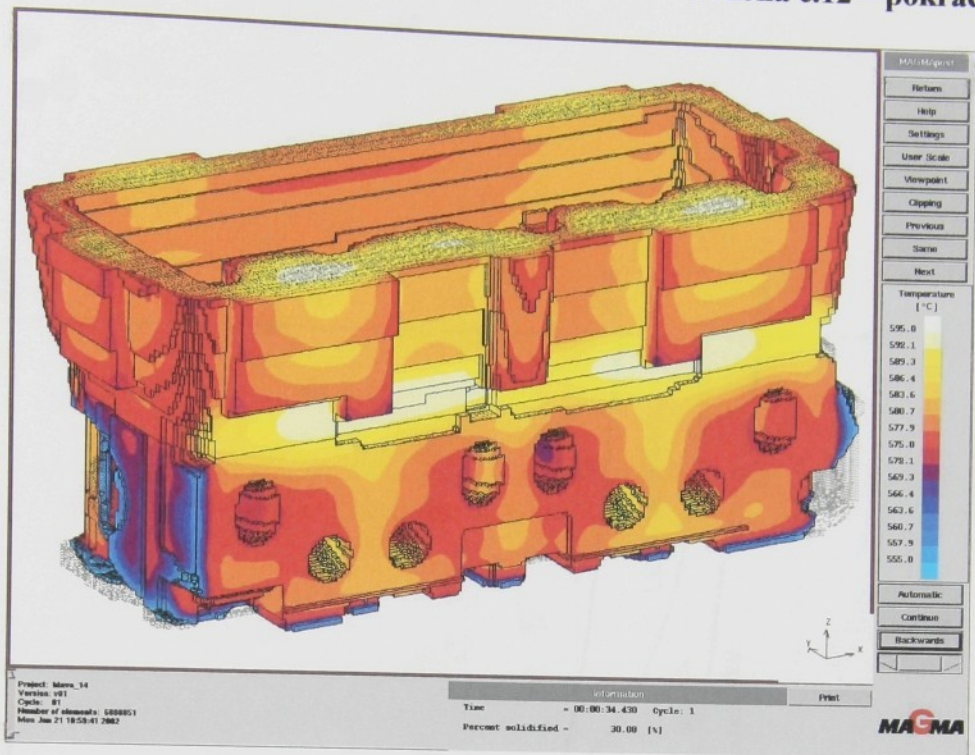
Simulační výpočet byl proveden s programem MAGMASoft, kde byly k výpočtu použity hodnoty veličin zjištěných při zpracovávání této disertační práce. K odlévání byla použita hliníková slitina AlSi10MgMn, která byla odlévána gravitačním způsobem do ocelové kokily ČSN 19 552.



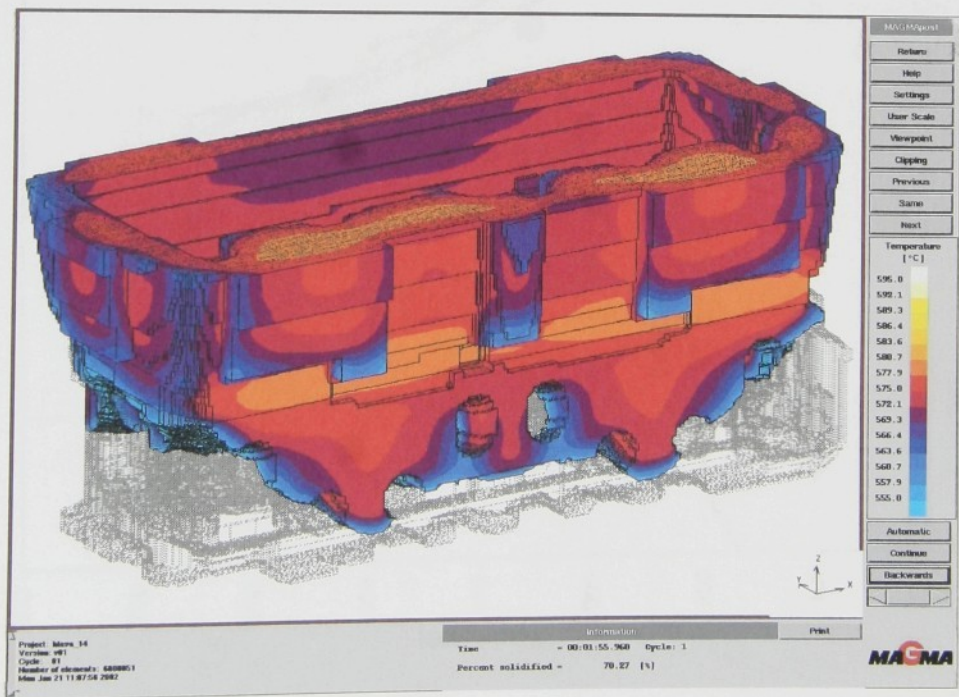
Obr. 1 Hlava spalovacího motoru odlitá do ocelové formy (ČSN 19 552) gravitačním litím



Obr. 2 Simulace plnění dutiny formy taveninou hliníkové slitiny



Obr. 3 Rozložení teplot v tuhnoucím odlitku hlavy motoru v časovém okamžiku 34 [s] po odlití $T_L = 595\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_S = 555\text{ }^{\circ}\text{C}$



Rozložení teplot v tuhnoucím odlitku hlavy motoru v 115 [s] po odlití



Vliv nástřiku líce formy na růst vzduchové mezery při odlévání čistého hliníku.



Vliv nástřiku líce formy na růst vzduchové mezery při odlévání AlSi13.

Příloha č.13 – pokračování



Vliv nástřiku líce formy na růst vzduchové mezery při odlévání AlSi10MgMn.

Příloha č.13 – pokračování



Vliv nástřiku líce formy na růst vzduchové mezery při odlévání čistého zinku.