

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TUHNUTÍ ODLITKŮ VE SKOŘEPINOVÝCH FORMÁCH PŘI ODLÉVÁNÍ VE VAKUU

SOLIDIFICATION OF CASTINGS BY POURING INTO SHELL MOULDS IN VAKUUM FURNACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN ODLOŽIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Odložil

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Tuhnutí odlitků ve skořepinových formách při odlévání ve vakuu

v anglickém jazyce:

Solidification of castings by pouring into shell moulds in vacuum furnaces

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem práce je analýza problematiky přestupu tepla při tuhnutí odlitků ve skořepinových formách ve vakuu. Studují se způsoby řízeného tuhnutí pomocí tepelných izolací. Zjišťují se struktury kovu a souvislost struktury s podmínkami tuhnutí.

Cíle diplomové práce:

Zjištění průběhu tuhnutí odlitků ve zkušebních skořepinových formách. Ověření vlivu tepelných izolací na teplotní pole odlitků a skořepinových forem. Analýza vlivu geometrického uspořádání skořepiny na teplotní poměry a na strukturu odlitků.

Seznam odborné literatury:

1. JÍCHA, M. Přenos tepla a látky. Skripta VUT. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
2. INCROPERA, FP. and DEWITT, DP. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 5th ed. New York: J. Wiley & Sons, 2002. 220 p. ISBN 0-471-07588-4.
3. RAŽNJEVIČ, K. Termodynamické tabulky. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1984. 313 s.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 13.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Experimentálním měřením ve vakuové peci byly zjišťovány teplotní poměry při odlévání a tuhnutí modelových soustav odlitků různých průměrů a izolací. Odlévaným kovem byla slitina Inconel 713LC na bázi niklu. Získané údaje byly použity pro optimalizaci při numerické simulaci tepelného režimu odlévání a tuhnutí. V modulu CAFE programu ProCast byla provedena numerická simulace struktury slitiny v jednotlivých odlitcích a simulované struktury porovnány se strukturou zjištěnou metalograficky. Optimalizované okrajové podmínky lze použít pro simulace reálných odlitků.

Klíčová slova

Přesné lití, přestup tepla, Inconel 713, vakuová pec, numerická simulace tuhnutí a struktury.

ABSTRACT

Heat transfer during metal pouring and its solidification in the vacuum furnace have been investigated by experiments using model set of castings of different diameters and insulations. The pouring metal was Inconel 713LC alloy based on nickel. The found data have been used for optimization of the numerical simulation of the thermal regime during the both pouring and solidification phases of the process in vacuum. Numerical simulation of the alloy structure in individual castings has been made by the CAFE module of the ProCast software and obtained results compared with the real structure. The optimized boundary conditions can be used for simulation of real castings.

Key words

Investment casting process, heat transfer, Inconel 713, vacuum furnace, numerical simulation of solidification and structure.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ODLOŽIL, Jan. *Tuhnutí odlitků ve skořepinových formách při odlévání ve vakuu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 101s., doc. Ing. Jaromír Roučka. CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Tuhnutí odlitků ve skořepinových formách při odlévání ve vakuu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29.5.2009

.....
Jan Odložil

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za velmi cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Šustkovi, Ph.D za pomoc při výrobě skořepiny, Ing. Petru Ňuksovi za pomoc při odlévání, Ing. Petru Šabackému za pomoc při výrobě vzorků, Ing. Marku Kováčovi za pomoc při simulaci, podniku První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s. a firmě MECAS ESI s.r.o., za umožnění využívání jejich zařízení a pomoc při obsluze.

Děkuji rodičům a přítelkyni za trpělivost a podporu při studiu.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
1. Úvod	11
2. Cíl diplomové práce	12
3. Rozbor tepelných poměrů při odlévání do skořepinových forem	12
3.1. Skořepinová forma	13
3.2. Teplotní režim skořepinové formy	14
3.2.1. <i>Akumulace tepla z kovu ve skořepině</i>	17
3.2.2. <i>Odvod tepla ze skořepiny do okolí</i>	19
4. Experimentální formy	26
4.1. Výroba experimentálních skořepinových forem	26
4.2. Způsoby tepelného ošetření pomocí izolace	27
5. Vakuová indukční pec	29
6. Odlévání kovů	32
7. Krystalizace niklových slitin	34
8. Systém měření teplot ve vakuové peci	36
8.1. Průběh měření teplot experimentálních skořepin	39
9. Experimentální formy D10-50	41
9.1. Způsoby tepelné izolace skořepiny D10-50	42
9.2. Průběh teplot skořepin D10-50	43
9.3. Diskuze výsledků průběhu teplot skořepin D10-50	49
9.4. Numerická simulace přenosu tepla ve formě D10-50	52
9.4.1. <i>Geometrie a materiálové termofyzikální parametry simulace</i>	53
9.4.2. <i>Počáteční a okrajové podmínky</i>	53
9.4.3. <i>Výsledky simulace teplotního průběhu formy D10-50 KRIZ iz</i>	55
9.4.4. <i>Simulace průběhu teplot formy D10-50 CEL iz</i>	57
9.4.5. <i>Simulace tuhnutí odlitků forem D10-50 KRIZ iz a CEL iz</i>	58
9.5. Makrostruktura odlitků D10-50	60
9.6. Numerická simulace makrostruktury odlitků D10-50 KRIZ iz	63
9.6.1. Numerická simulace makrostruktury odlitků D10-50 CEL iz	67
9.7. Zkoušení mechanických vlastností odlitků D10-50	67
9.7.1. <i>Zkoušky tvrdosti odlitků D10-50</i>	70
9.7.2. <i>Zkoušky pevnosti v tahu odlitků D10-50</i>	71
10. Experimentální formy 3xD50	72
10.1. Způsoby tepelné izolace skořepiny 3xD50	73
10.2. Průběh teplot skořepin 3xD50	73
10.3. Diskuze výsledků průběhu teplot skořepin 3xD50	76
10.4. Numerická simulace tuhnutí odlitků ve formě D10-50	77
10.5. Makrostruktura odlitků 3xD50	80
10.6. Numerická simulace makrostruktury odlitků 3xD50	81
10.7. Zkoušky tvrdosti odlitků 3xD50	84
11. Experimentální formy lopatek	85
11.1. Způsoby tepelné izolace skořepiny lopatek	86
11.2. Průběh teplot skořepiny lopatek	87
11.3. Diskuze průběhu teplot skořepin lopatek	90

11.4. Numerická simulace tuhnutí odlitků lopatek	91
11.5. Makrostruktura odlitků lopatek	94
11.6. Numerická simulace makrostruktury lopatek	96
11.7. Zkoušení mechanických vlastností lopatek	96
11.7.1. Zkoušky tvrdosti	96
11.7.2. Zkoušky pevnosti v tahu	97
12. Závěr	98
Seznam použitých zdrojů	100

1 ÚVOD

Tavení a odlévání niklových slitin s velmi vysokými nároky na kvalitu se uskutečňuje ve vakuu do skořepinových forem zhotovených metodou přesného lítí na vytavitelný model. Při výrobě těchto součástí se stále prosazují vyšší požadavky na jakost, povrch, rozměrovou přesnost, vnitřní čistotu s předem definovanou strukturou, ale také i na cenu.

Mezi stěžejní odlitky s nejvyššími nároky patří komponenty spalovacích turbín jako jsou lopatky, rozváděcí kola, statorové díly. Pro odlévání takto složitých součástí ze žáropevných slitin niklu např. Inconel 713LC je tavení a odlévání ve vakuu nezbytností.

Z důvodů poměrně vysoké náročnosti na výrobu odlitků s velkou přidanou hodnotou, je důležité vyladit celý proces tak, aby nedocházelo ke zbytečnému navyšování nákladů při hledání optimálních parametrů pokusným odléváním. Ideálním nástrojem pro nalezení nejvhodnějšího řešení při procesu přesného lítí jsou simulační programy, pomocí kterých lze modelovat různé fáze od vstřikování vosku přes lítí tekutého kovu až po tuhnutí, ještě před samotnou konstrukcí formy.

Kromě modelování tečení kovu ve formě a analýzy tuhnutí mohou pokročilé simulační programy jako např. ProCast vyhodnocovat tepelné napětí v odlitku a základní struktury zrna.

Aby se fyzikální jevy namodelovaly přesně, je nezbytné, aby byl správně vypočítán přenos tepla v soustavě kov – skořepina – okolí. Většina simulačních programů, které jsou v současnosti na trhu k dispozici, předpokládá základní výpočty přestupu tepla pro jednoduché těleso, které však neplatí pro složitá tělesa a tvary. Program ProCast respektuje uspořádání odlitků na stromečku pro přesné lítí, navíc zahrnuje vizualizaci účinků přestupu tepla radiací.

Rozboru tepelných poměrů při odlévání do skořepinových forem ve vakuu se zatím nevěnovala žádná pozornost a k dispozici nejsou ani ověřené údaje pro simulaci odlévání a tuhnutí. Pro verifikaci výsledků a upřesnění okrajových podmínek simulací bylo tedy nutné provést experimentální měření.

2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je:

- analýza problematiky přestupu tepla při tuhnutí odlitků ve skořepinových formách ve vakuu
- zjistit průběh tuhnutí odlitků ve skořepinových formách na zkušebních odlitcích
- ověření vlivu izolací na teplotní poměry
- zjištění struktury kovu a souvislost struktury s podmínkami tuhnutí
- upřesnit okrajové podmínky numerické simulace tuhnutí a struktury

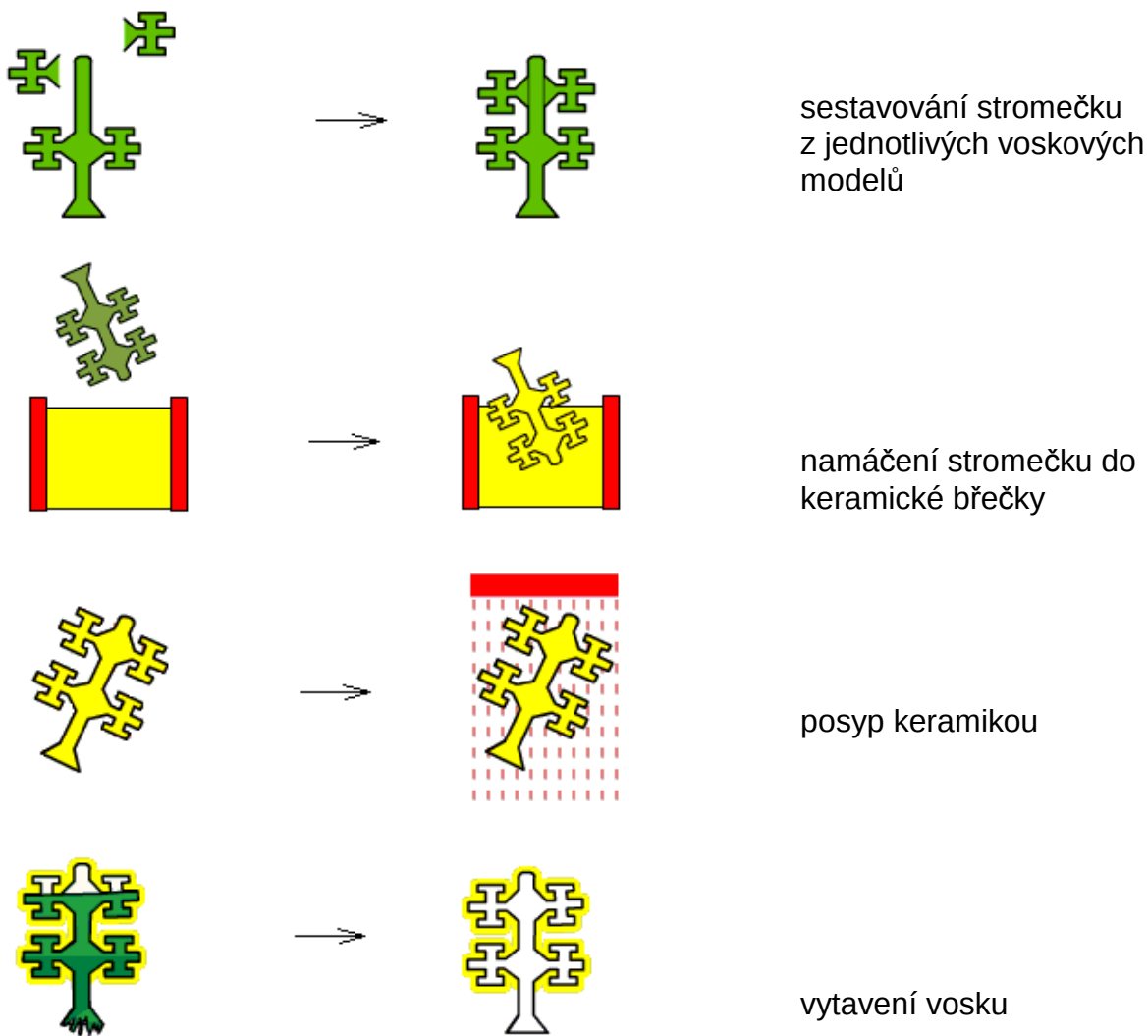
Diplomová práce je dílčí součástí projektu *FT-TA3/072: „Výzkum řízení procesu krystalizace vysoce náročných odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu s využitím numerické simulace“*.

3 ROZBOR TEPELNÝCH POMĚRŮ PŘI ODLÉVÁNÍ DO SKOŘEPINOVÝCH FOREM

3.1 Skořepinová forma

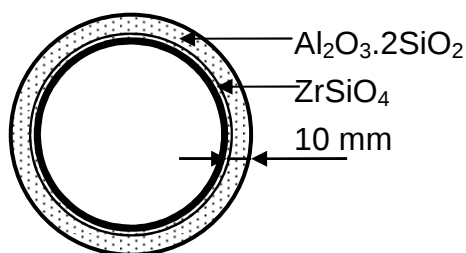
Princip výroby skořepinové formy zhotovené metodou přesného lití na vytavitelný voskový model je schematicky naznačen na obr 3.1.

Jednotlivé voskové modely jsou lepeny na vtokový kůl a vytváří společně tzv. „stromeček“. Tento voskový stromeček je po odmaštění ponořen do keramické břechky, pomocí otáčení je vytvořen souvislý film lícního obalu, který je posypán ostřivem vhodné zrnitosti a následně usušen. Jednotlivé vrstvy se od sebe vzájemně liší hrubostí ostřiva, pro první obal je použito nejjemnější ostřivo, postupným navyšováním počtu obalů se používá ostřiva hrubšího. Postup namáčení, posypávání a schnutí se opakuje až do vytvoření dostatečné tloušťky skořepiny. [1]



Obr.3.1 Princip technologie výroby skořepinové formy na vytavitelný model [2]

Pro samonosné skořepinové formy lopatek vyráběné v PBS je použito pro první obal keramické břečky z plnivem ZrSiO_4 a jemné ostřívo molochit ($d=0,18-0,5$ mm), na další obaly pak plnivo molochit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) a hrubější ostřívo molochit ($d=0,5-1$ mm). Celkový počet obalu je přibližně devět a tloušťka skořepiny se pohybuje okolo 10 mm (Obr. 3.2). [3]



Obr.3.2 Řez skořepinovou formou

Následně je vosk vytaven v autoklávu a skořepina vyžihána pro odstranění zbytků nežádoucích látek jako je voda a vosk a dosažení mechanické pevnosti.[1]

3.2 Teplotní režim skořepinové formy

Teplotní režim skořepinové formy při odlévání ve vakuu se v různých fázích procesu mění. (obr.3.3):

Popis jednotlivých fází:

- žihání skořepiny
- transport ze žihací pece do kokilové komory vakuové pece
- prodleva v kokilové komoře do počátku lití
- odvod tepla z formy po odlití kovu [4]

• Žihání skořepiny

Žihání skořepinové formy probíhá v žihací peci po dobu minimálně jedné hodiny, za tuto dobu lze předpokládat, že teplotní pole skořepiny je homogenní.

• Transport ze žihací pece do kokilové komory vakuové pece

Při transportu vyžihané skořepiny dochází k celkovému ochlazování ze žihací teploty. Odvod tepla se uskutečňuje sáláním a konvekcí do okolního prostředí. Snahou je, aby transport proběhl co nejrychleji.

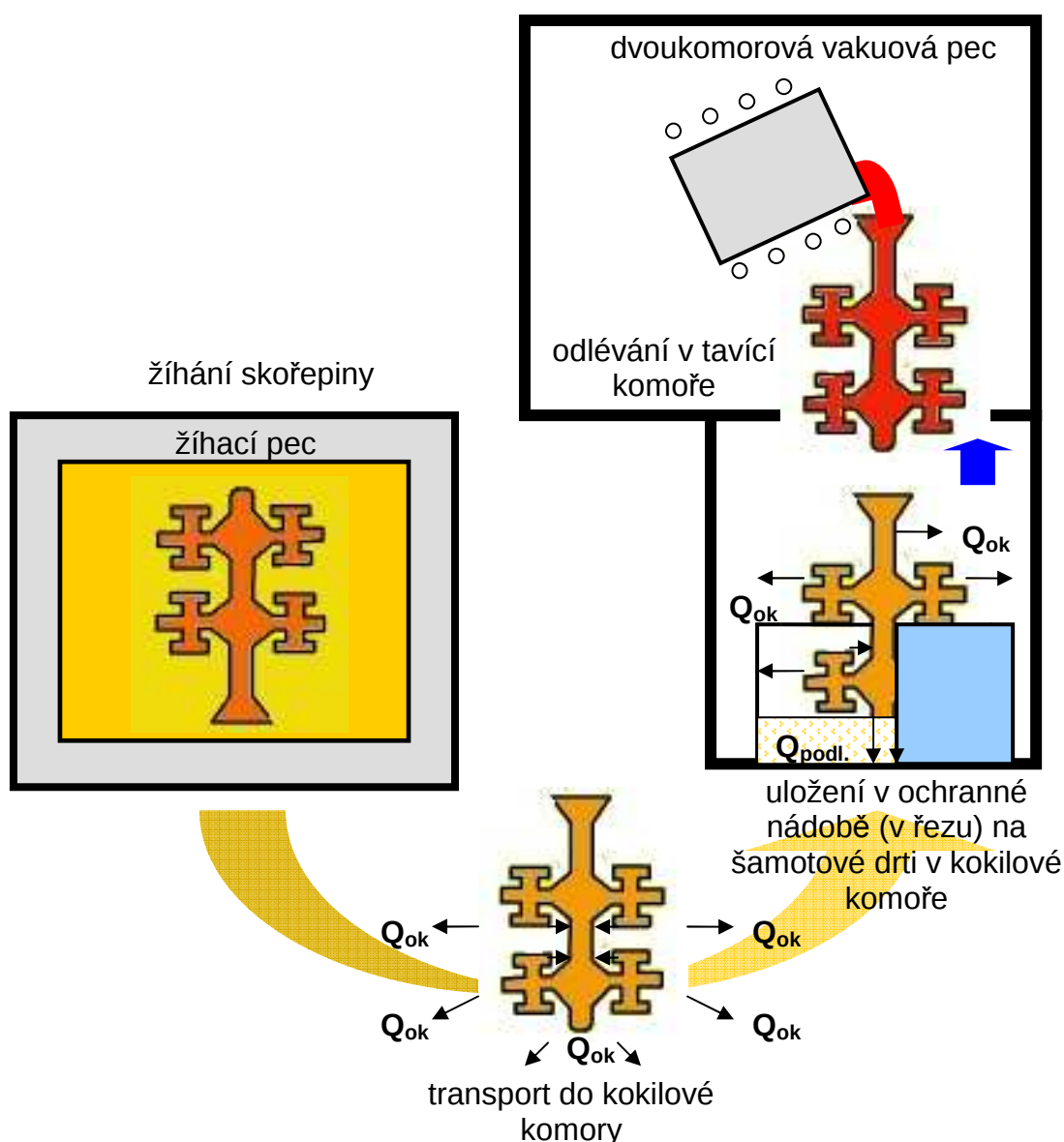
• Prodleva v kokilové komoře do počátku lití

Při prodlevě v uzavřené kokilové komoře dochází k ochlazování převážně sáláním do okolí pece a jednak vedením po podložky přes kontaktní plochy. Konvektivní odvod tepla ve vakuu je nulový. Snahou je, aby prodleva do lití byla co nejkratší. Odvod tepla při propojení kokilové a tavící se nemění, neboť obě komory mají v době propojení stejnou hodnotu tlaků (vakua).

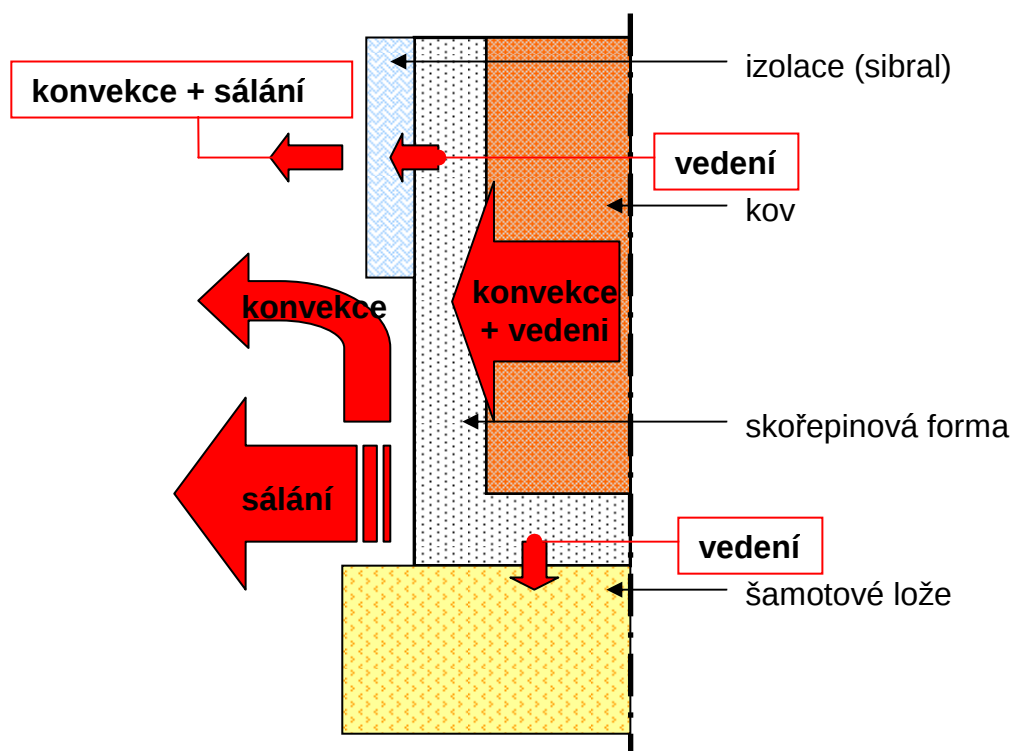
V důsledku těchto etap dojde v poklesu teploty skořepiny. Ve formě se vytvoří nehomogenní teplotní pole, které je definované výškou teploty. Je snaha o co nejmenší ochlazování, aby počáteční teplota při lití byla co nejvyšší. Teplota formy při odlévání je závislá na žíhací teplotě, tvaru skořepiny a době mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím.

- **Odvod tepla z formy po odlití kovu**

Po odlití jsou komory odděleny, kokilová komora zavzdušněna pro vyrovnání tlaků s okolím a na odvodu tepla se uplatňují všechny tři mechanismy – vedení, proudění, sálání (obr.3.4). [4,5]



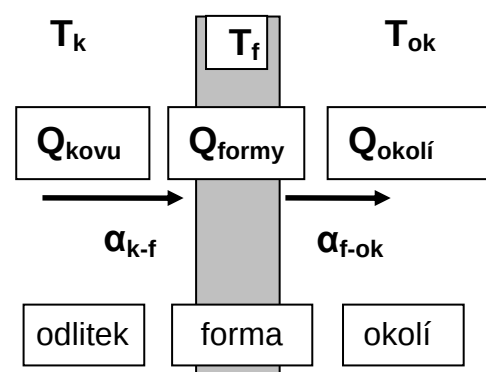
Obr. 3.3 Schéma teplotního režimu skořepinové formy mezi žíhací pecí a litím ve dvoukomorové vakuové peci



Obr. 3.4 Schéma odvodu tepla po odlití ve skořepinové formě [6]

Krystalizace odlitků ve skořepinových formách je řízena způsobem přenosu tepla v systému odlitek – skořepinová forma – okolní prostředí, které se uskutečňuje podle schématu na obr.3.5.

Z odlitého kovu v průběhu tuhnutí je nutno odvést teplo přehřátí z tekutého kovu a krystalizační teplo. Toto teplo je ve skořepinové formě částečně akumulováno a částečně odvedeno do chladnějšího okolního prostředí, přičemž platí:



Obr.3.5 Přenos tepla z odlitku v intervalu tuhnutí

$$\Delta Q_{kovu} = \Delta Q_{formy} + \Delta Q_{okolí} \quad (3.1)$$

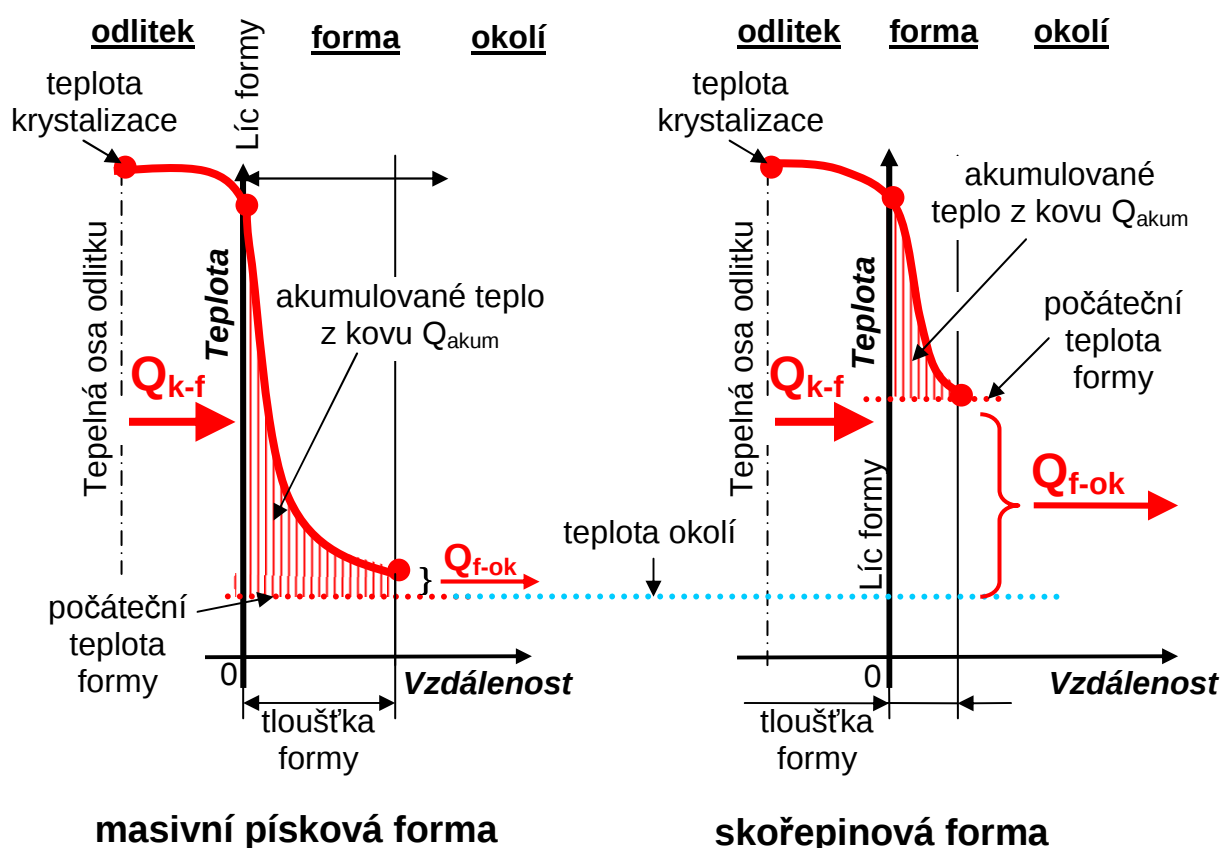
Dynamika procesu přenosu tepla je závislá na:

- geometrickém uspořádání, hustotě a hmotnostech jednotlivých komponent (ρ_{kovu} , ρ_{formy} , m_{kovu} , m_{formy})
- postupu zaplňování dutiny formy tekutých kovem
- počátečních teplotách všech prvků systému a jejich prostorovém rozložení (T_{kov} , T_{forma} , $T_{okolí}$)
- intervalu krystalizace a krystalizačním teple kovu (T_{liq} , T_{sol} , $Q_{krystal}$)

- součiniteli vedení tepla (λ_{kovu} , λ_{formy})
- měrné tepelné kapacity (C_{kovu} , C_{formy})
- podmínkách přenosu tepla z kovu do formy, charakterizovaných součinitelem přestupu tepla na hranici kov-forma ($\alpha_{\text{kov-forma}}$)
- podmínkách ochlazování na vnějším povrchu formy, vyjádřené zejména teplotou okolí a součinitelem přestupu tepla z formy do okolí ($\alpha_{\text{forma-kov}}$) [4]

3.2.1 Akumulace tepla z kovu ve skořepině

Tepelné pochody při lití do skořepinových forem se od jiných slévárenských technologií liší akumulovaným teplem ve formě a teplem odvedeným do okolního prostředí.



Obr. 3.6 Schéma tepelných polí v masivní pískové a skořepinové formě ve stejném časovém okamžiku [7]

Zatímco při lití do masivních forem z disperzních materiálů (do pískových forem) nebo do forem kovových (tlakové nebo gravitační lití) se převážná část fyzikálního tepla odlitku, odvedeného během tuhnutí akumuluje ve hmotě formy a odvod tepla do okolí představuje podstatně menší část, při lití do žíhaných, relativně tenkostěnných skořepinových forem je rozhodující podíl tepla odvedeného do okolí obr.3.6. [4]

Přestup tepla mezi kovem a formou vedením přes rozhraní obou prostředí lze popsat Newtonovým zákonem, který stanovuje celkové množství tepla Q , přecházející z odlitku do formy: [7]

$$\dot{Q}_{KON} = \alpha_{k-f} \cdot (T_k - T_f) \cdot S \quad (3.2)$$

kde α_{k-f} – součinitel přestupu tepla mezi kovem a formou
 T_k – teplota kovu
 T_f – teplota formy
 S – styčnou plochu mezi odlitkem a formou

Akumulace tepla způsobuje zvyšování teploty skořepiny, část je odvedena do okolního prostředí. Akumulované teplo z tuhnoucího odlitku závisí nejen na materiálových podmínkách odlévané slitiny a formy, ale také na výměně tepla mezi formou a okolím. Množství tepla, které je forma schopna akumulovat se určí ze vztahu: [7]

$$Q_{akum} = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

kde m_f – hmotnost formy
 c_f – měrná tepelná kapacita formy
 T – rozdíl teplot

U skořepinových forem hraje důležitou roli její tloušťka vzhledem k tloušťce odlitku. Pokud je tloušťka odlitku ku tloušťce skořepiny výrazně nižší, pak u takto tlusté stěny s velkou hmotností během tuhnutí prakticky nedojde ke zvýšení teploty na vnější straně formy a většina tepla se akumuluje, stejně jako u masivních pískových forem. U tenké stěny s malou hmotností (ku tloušťce stěny odlitku) dojde k velkému prohrátí i na vnější stěně, významná část tepla je odvedena do okolí a jen malá část je akumulována ve formě (obr. 3.6).

Současně sehrává roli i počáteční teplota formy. Pokud ohřejeme skořepinovou formu až na lící teplotu kovu, pak z důvodu nulového teplotního spádu (3.2) nebude docházet k výměně tepla mezi taveninou a skořepinou. Teprve v okamžiku vytvoření tepelného spádu mezi tuhnoucí taveninou a formou dojde mezi nimi k výměně tepla díky vnějšímu ochlazování skořepiny.

Vzhledem k tomu, že již na počátku je skořepinová forma vyžehána na teplotu mnohonásobně vyšší než okolí, a z hledem k její tloušťce oproti odlitkům, je skořepina spíše vodič než akumulátor tepla. [7]

3.2.2 Odvod tepla ze skořepiny do okolí

Odvod tepla nastává zejména dvěma mechanismy – prouděním do vzduchu obklopující formu a zářením na chladnější povrchy, které jsou v přímé viditelnosti. Odvod tepla vedením do okolí se uskutečňuje pouze přes kontaktní plochy. [4]

Na obr 3.7 je schematicky znázorněn přestup tepla z odlitku přes stěnu skořepiny do okolí v řezu, kdy je tepelný tok do okolí rozhodující měrou přenášěn jen ve směru přes stěnu formy o šířce δ a teplota se mění jen v závislosti na poloze napříč stěnou skořepiny.

Pro zjednodušení výpočtu se zavádí pro jednotlivé úseky tepelné odpory R – R_{k-f} tepelný odpor proti konvekci na straně taveniny, R_λ proti vedení a tepla stěnou skořepiny a R_{f-ok} proti konvekci na straně okolí. Pro součet odporů $\sum R$ se analogicky využívá Ohmova zákona:

$$\sum R = R_{k-f} + R_\lambda + R_{f-ok} = \frac{1}{\alpha_{k-f} \cdot S} + \frac{\delta}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{\alpha_{f-ok} \cdot S} \quad (3.4)$$

Pro celkový přenášený tepelný tok platí rovnice:

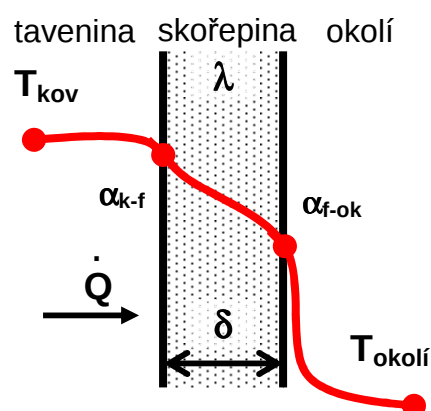
$$\dot{Q} = \frac{T_{kov} - T_{okolí}}{\sum R} \quad (3.5)$$

kde S – plocha stěny
 λ – součinitel tepelné vodivosti. [5]

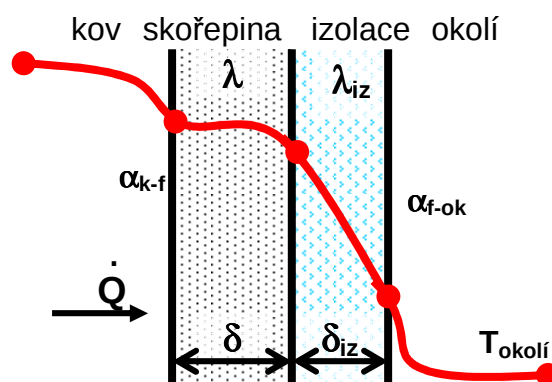
Ražnjevich v tabulkách [9] uvádí pro keramické materiály hodnotu tepelné vodivosti 1,5 W/mK pro 20°C, s rostoucí teplotou hodnota stoupá k 2W/mK pro 1000°C.

V případě že skořepina bude obalena izolací (obr3.8), stává z jednoduché stěny stěna složená ze dvou vrstev. Každá vrstva má pak vlastní tepelnou vodivost a tloušťku. Rovnice (3.4) se rozšíří o odpor R_{iz} , který bude vyjadřovat odpor vedení izolační vrstvou a bude roven:

$$R_{iz} = \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot S} \quad (3.6)$$



Obr.3.7 Schéma prostupu tepla z odlitku přes stěnu skořepiny [8]



Obr.3.8 Schéma prostupu tepla z odlitku přes stěnu skořepiny s izolací [8]

Suma odporu bude pak rovna:

$$\sum R = R_{k-f} + R_{\lambda} + R_{iz} + R_{f-ok} \quad (3.7)$$

Dosazením (3.7) do (3.5) zjistíme celkový přenášený tok z taveniny přes skořepinovou formu a izolaci do okolí. [5]

Jako tepelná izolace se ve slévárně PBS používá izolace Sibral firmy Unifrax (dříve Keraunion Dubí) z hlinitokřemičitých vláken a to tloušťek 6,5-20mm. Hodnoty tepelné vodivosti v závislosti na teplotě izolace Sibral jsou uvedeny v tab.3.1. Jak je z tabulky patrné, hodnoty vodivosti izolace v porovnání s hodnotou vodivosti skořepinové formy jsou desetkrát menší, tudíž tepelný odpor izolace při stejné tloušťce vrstvy jako skořepina je desetkrát vyšší. Tím se zvětší i celý tepelný odpor soustavy a celkový přenášený tepelný tok se tedy sníží a celá skořepina se bude déle ochlazovat. Vhodným použitím izolací pouze na části skořepiny můžeme vytvořit uvnitř skořepiny podélný teplotní gradient a dosáhnout tak usměrněného tuhnutí.

Tab. 3.1.: Hodnoty tepelné vodivosti izolace Sibral : [10]

Teplota [°C]	λ_{iz} [W/mK]
300	0,085
500	0,126
700	0,176
900	0,261
1100	0,342

Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla α_{f-ok} vyjadřuje v našem případě celkovou intenzitu přestupu tepla jak konvekcí tak i radiací.

$$\alpha_{CELK.f-ok} = \alpha_{KON.f-ok} + \alpha_{RAD.f-ok} \quad (3.8)$$

Radiační součinitel přestupu tepla je vhodné zavést z důvodu vyjádření radiačního tepelného toku analogicky ke konvektivnímu přestupu tepla (3.2):

$$\dot{Q}_{RAD.f-ok} = \alpha_{RAD.f-ok} \cdot S \cdot (T_f - T_{ok}) = \varepsilon \sigma S (T_f^4 - T_{ok}^4) \quad (3.9)$$

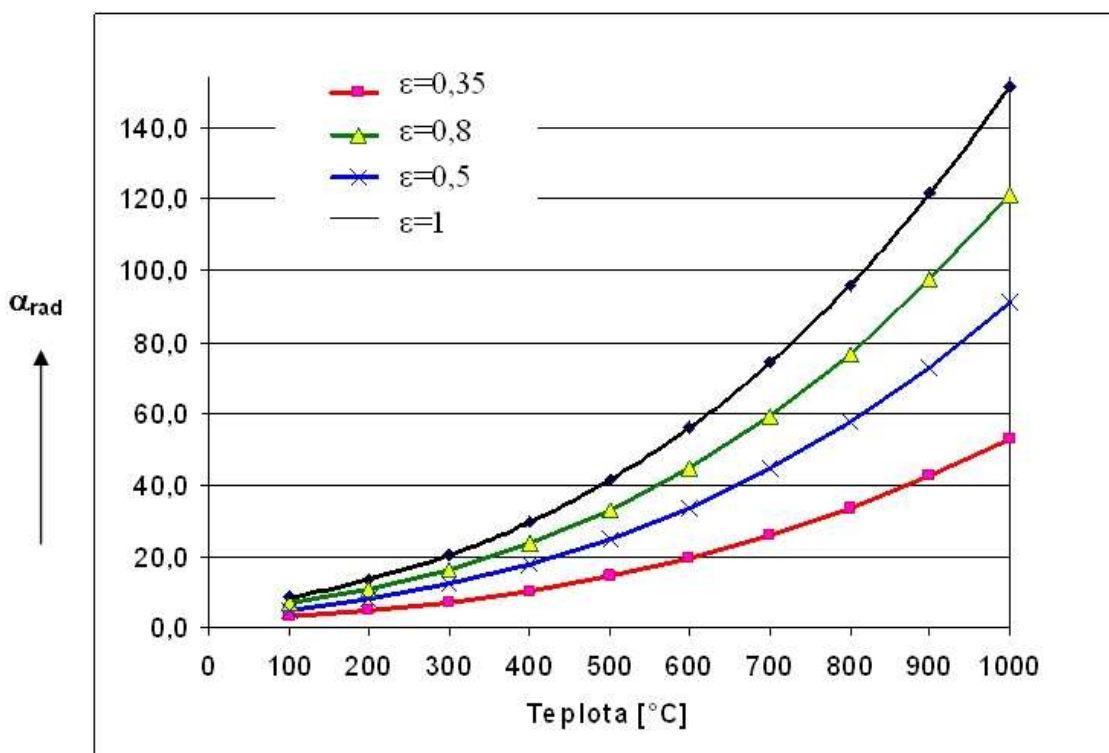
Součinitel přestupu tepla radiací je při teplotách odlévání do skořepinových forem mnohonásobně vyšší než součinitel konvektivní a se vzrůstající teplotou výrazně roste (obr.3.9) a je závislý na emisivitě formy, definován je:

$$\alpha_{RAD.f-ok} = \varepsilon \sigma (T_f^2 + T_{ok}^2)(T_f + T_{ok}) \quad (3.10)$$

Celkový odvod tepla ze skořepiny (konvektivní i radiační) lze vyjádřit: [4,5]

$$\dot{Q}_{f-ok} = \alpha_{f-ok} \cdot S \cdot (T_f - T_{ok}) = (\alpha_{KON.f-ok} + \alpha_{RAD.f-ok}) \cdot S \cdot (T_f - T_{ok}) \quad (3.9)$$

V termodynamických tabulkách [9] se hodnota emisivity ε pro nekovové materiály jako je šamot, křemen pohybuje v rozsahu 0,6-0,9. Pro zpřesnění této hodnoty bylo v rámci dřívějších prací [4,6] provedeno měření termokamerou a termočlánky – porovnáním těchto hodnot byla hodnota emisivity keramické molochitové formy stanovena v rozmezí 0,7-0,9.



Obr. 3.9 Závislost součinitele radiačního přestupu tepla α_{Rad} na teplotě a emisivitě formy [1]

V práci [4] byly tepelné toky kvantitativně analyzovány na modelové skořepině, tvořené 8 válcovými odlitky průměru 50 mm, délky 300 mm umístěné symetricky ve svislé poloze na roztečné kružnici kolem centrálního vtokového systému. Z výsledků vyplývá, že pro modelovou skořepinu při teplotě molochitové formy 773K (500°C) a odpovídající emisivitě $\varepsilon=0,8$ je hodnota $\alpha_{RAD.f-ok}=30 \text{ W/m}^2\text{K}$, při

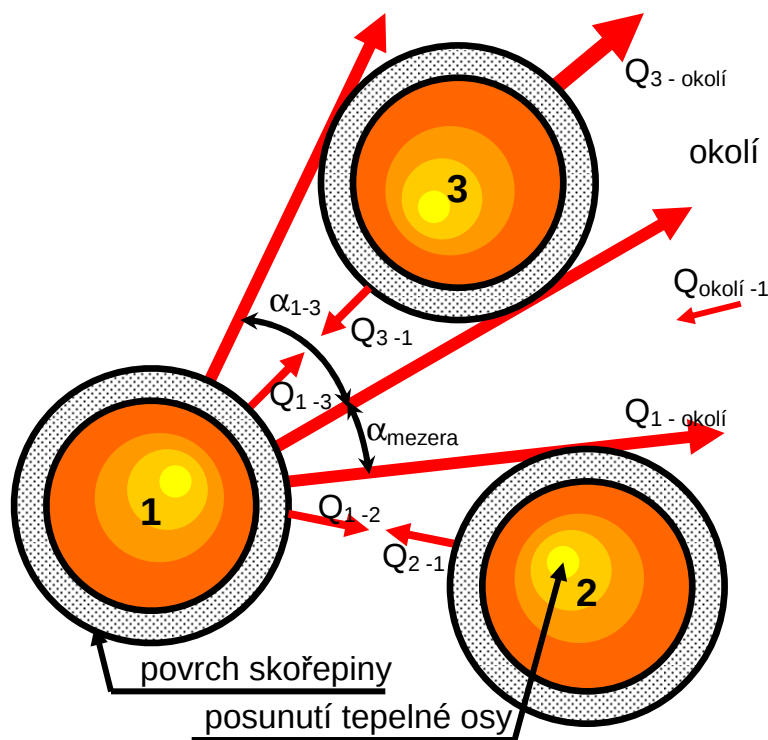
téměř dvojnásobné absolutní teplotě 1273 K (1000°C) a stejné emisivity je hodnota $\alpha_{\text{RAD.f-ok}}=120 \text{ W/m}^2\text{K}$, což je čtyřikrát více.

Konvektivní součinitel se s teplotou modelové skořepiny v porovnání s radiačním součinitelem mění jen málo a dosahuje pro teplotu formy 500°C hodnoty $\alpha_{\text{KON.f-ok}}=7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, což odpovídá při stejné teplotě třetinové hodnotě $\alpha_{\text{RAD.f-ok}}$. Pro teplotu 1000°C hodnoty $\alpha_{\text{KON.f-ok}}=8,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, oproti $\alpha_{\text{RAD.f-ok}}$ pro 1000°C je hodnota více než desetkrát menší a za nejvýznamnější odvod při takto vysokých teplotách lze jednoznačně označit odvod tepla radiací.

Při ochlazování modelové skořepiny proudem vzduchu nucenou konvekci běžnou rychlostí vyskytující se ve slévarenských podmínkách při odlévání bylo zjištěno, že konvektivní součinitel se zvyšuje pouze místně a na celkovou intenzitu ochlazování modelové formy nemá významný vliv. [4]

Ve vakuu je konvektivní odvod tepla nulový.

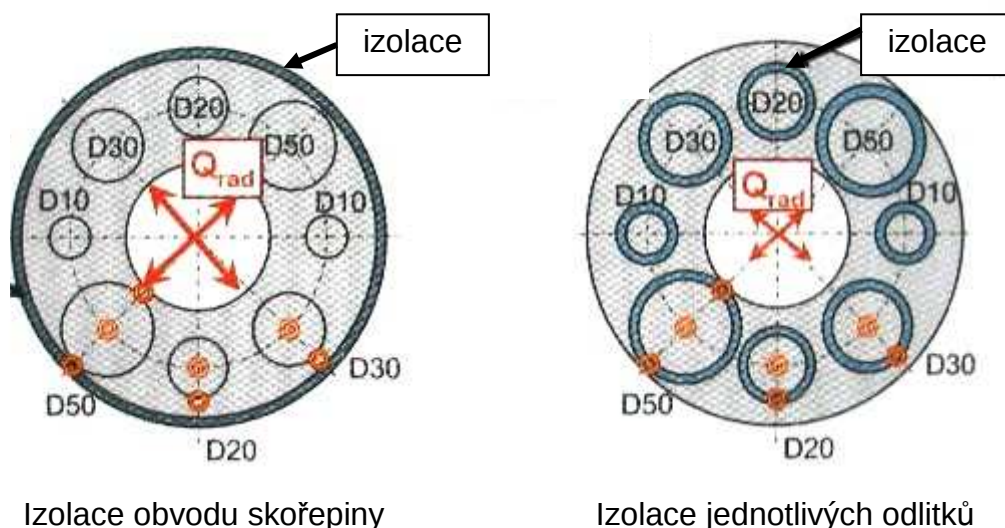
Při odlévání složitějších odlitků a u forem tvořených více odlitky dochází ke vzájemnému osálávání jednotlivých stěn a elementů stromečku (obr. 3.10). To má za následek nesteromerný odvod tepla z různých částí skořepiny.



Obr. 3.10 Přenos tepla sáláním mezi elementy formy a okolím, vliv vzájemného osálávání na posunutí tepelné osy [4]

Povrchy směřující směrem ven ze stromečku odvádí teplo radiací stejné jako ostatní povrchy směřující do středu (při stejné teplotě obou povrchů), ale na

rozdíl od těchto vnitřních povrchů, venkovní již žádné nepřijímají (při velkém rozdílu teploty skořepiny a teploty okolí je přívod tepla radiací z okolí zanedbatelný) – tudíž se povrchy směřující ven ochlazují více, než povrchy směřující dovnitř. Toto nestejnoměrné ochlazování má za následek posunutí teplotní osy mimo osu geometrickou. Na základě nesymetrie teplotního pole lze očekávat i nesymetrii struktury a vlastnosti odlitků.

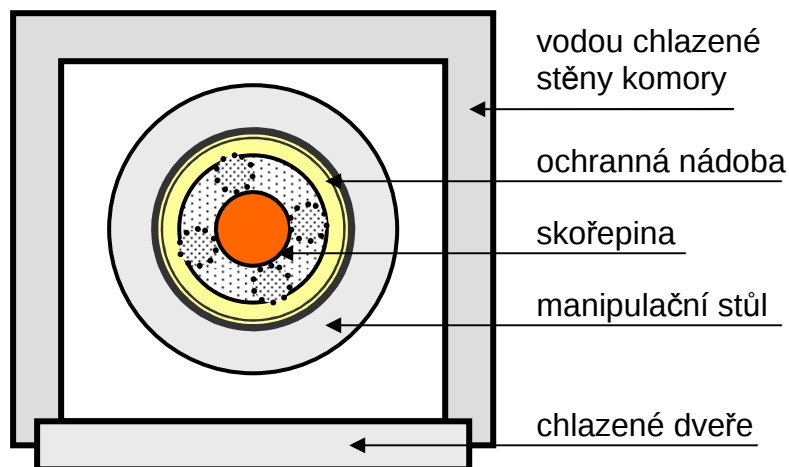


Obr. 3.11 Schéma tepelné izolace forem [4]

Vhodným použitím izolací lze nestejnoměrnému ochlazování částečně zabránit. V rámci pokusů práce [4] bylo zjištěno, že při izolaci celého obvodu skořepiny (obr.3.11) se zpomalil odvod tepla z vnější strany radiací do okolního prostředí, avšak vzájemné osálávání jednotlivých částí formy zůstalo zachováno. Při izolaci jednotlivých odlitků na stromečku se omezila radiace směrem do okolí i vzájemné osálávání odlitků ve skořepině. U obou metod se zpomalila intenzita ochlazování a zvýšila se teplotní symetrie v průřezu odlitků, navíc se snížili rozdíly rychlostí tuhnutí tlustých a tenkých profilů odlitků, doba tuhnutí se výrazně prodloužila. V extrémním případě lze radiaci kompletně odstranit uložením skořepiny do pískového lože. [4,11]

Uspořádání jednotlivých částí stromečku a vyzařování tepla z povrchu skořepiny zaizolováním jsou jediné parametry, kterými může technolog běžně ovlivňovat přestup tepla radiací. [11]

Při odlévání skořepin ve vakuu je skořepina umístěna v kokilové komoře v ochranné plechové nádobě (obr.3.12). Stěny kokilové komory jsou chlazené přibližně na teplotu kolem 25°C - z důvodu neměnnosti této teploty lze považovat komoru za pohlcovač záření. Ochranná nádoba sama o sobě zadržuje teplo jeho odražením zpět. Nádoba slouží jako ochrana proti přelití, případně prasknutí skořepiny a vytečení kovu – její výška odpovídá polovině výšky skořepiny.

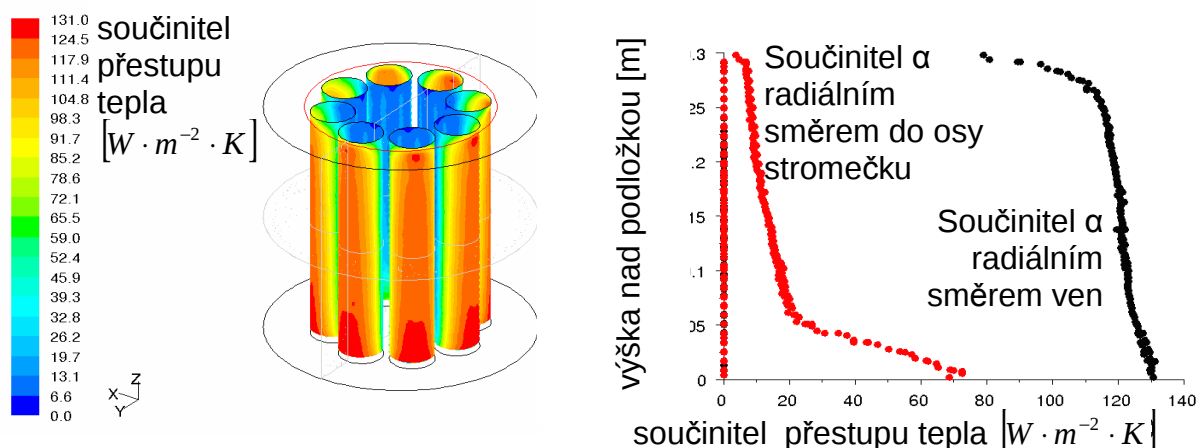


Obr. 3.12 Schéma umístění skořepiny v kokilové komoře vakuové pece

Radiační odvod tepla reálné skořepiny nelze analytickou cestou stanovit, v dostupné literatuře [5,12] se uvádí pouze vztahy pro jednoduché modelové příklady, které nemohou přesně postihnout celý stromeček, druhým problémem je stanovení úhlových součinitelů pro jednotlivé elementy formy. Situace je řešitelná pouze numerickou simulací.

Zatímco přenos tepla vedením a prouděním vyžaduje přítomnost hmotné látky, záření je proces, který probíhá i v absolutním vakuu. [8]

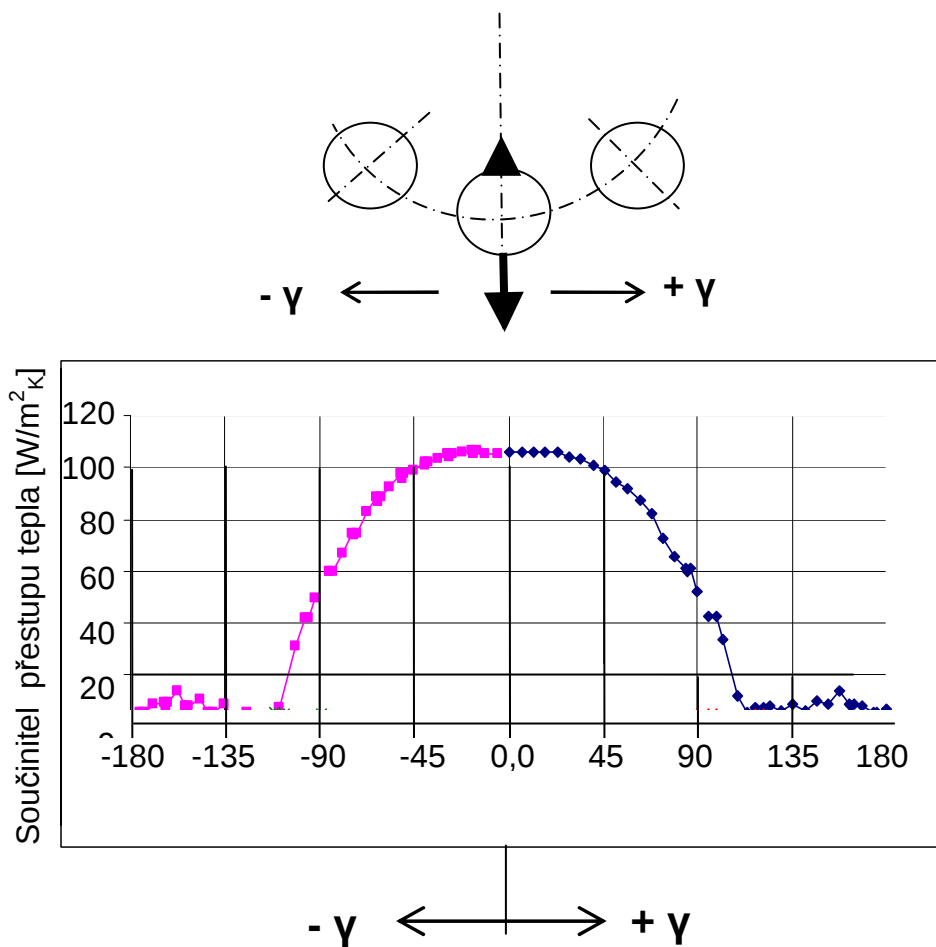
V práci [4] bylo na dříve uvedené modelové uložení na podložce ze suchého písku (kolem stromečku byl plechový kryt), provedeno numerické řešení přenosu tepla pomocí programu FLUENT. Pro výpočet byla uvažována skořepina s homogenní teplotou povrchu 1000°C při přirozené konvekci vzduchu.



Obr. 3.13 Hodnoty celkového součinitele přestupu tepla směrem do osy a vně stromečku [4]

Na obr. 3.13 je prostorová mapa hodnot celkového součinitele přestupu tepla. Je zřejmé, že intenzita ochlazování je podstatně větší směrem radiálně ven než směrem do osy stromečku. (Ve spodní části křivky se uplatňuje vliv podložky).

Na obr. 3.14 je rozložení přestupu tepla sáláním po obvodě jednotlivých odlitků. Směrem dovnitř stromečku je, vlivem vzájemného osálávání jednotlivých odlitků, množství vysálaného tepla minimální.



Obr. 3.14 Rozložení součinitele přestupu tepla sáláním po obvodě odlitků ve vakuu [4]

Intenzita ochlazování je po obvodě odlitku velmi nehomogenní a poměr celkových součinitelů ve směru axiálním do osy stromečku a směrem ven z formy dosahuje hodnot 5:1. Důsledkem toho je nesymetrie teplotního pole odlitku.

4 EXPERIMENTÁLNÍ FORMY

Pro získání vstupních termo-fyzikálních dat pro numerickou simulaci tuhnutí odlitků ve skořepinových formách, ověření reálných poměrů, vlivu izolací, zjištění struktury odlitků, tuhoucích rozdílnými rychlostmi a jejich mechanických vlastností, bylo nutné navrhnout experimentální zkušební formy, na níž mohla být provedena potřebná termická měření a na získaných odlitcích strukturní a mechanické zkoušky.

Na základě teoretického rozboru přenosu tepla z tekutého kovu do skořepinové formy a okolního prostředí, byly navrženy skořepinové formy s různou geometrií, uspořádáním a způsobem izolace.

Rozmístění na vtokové soustavě a způsob lití musel zaručit pro všechny zkušební vzorky stejnou licí teplotu, chemické složení taveniny a stejnou teplotu skořepiny při počátku plnění kovem.

Použité experimentální formy lze rozdělit do tří částí:

1. Skořepinová forma tvořená 8 válcovými odlitky průměrů $\varnothing$ 10, 20, 30, 50 mm se stejnými typy izolací (označení D10-50) (KAP. 9)
2. Skořepinová forma tvořená 3 válcovými odlitky stejného průměru $\varnothing$ 50 mm s různou izolací (označení 3xD50) (KAP. 10)
3. Skořepinová forma tvořená 4 odlitky lopatek spalovací plynové turbíny (označení lopatka) (KAP. 11)

4.1 Výroba experimentálních skořepinových forem

Veškeré skořepinové formy byly vyrobeny standardním způsobem výroby forem v PBS Velká Bíteš.

Voskové modely byly zhotoveny z vosku od firmy Remet na vstřikovacím lisu Shell-O-Matic (vstřikovací tlak 600-700Psi, čas 3 min), případně gravitačním litím do kovové formy. Způsob nalepení byl proveden dle obr.9.1, 10.1, 11.1.

Pro měření teplot termočlánky (KAP 8) bylo nutné do voskových modelů umístit ochranné křemenné trubice $\varnothing$ 4 mm se zataveným koncem a to zasunutím do vyvrtaných otvorů ve voskových modelech.

Před obalováním jsou voskové stromečky odmaštěny speciálním prostředkem na odmašťování voskových modelů - Pattern Washem firmy Remet.

Pro 1. obal se použilo keramické břechky na vodní bázi s plnivem zirkon ZrSiO_4 Mesh 200 ($d_{\text{max}} = 0,075 \text{ mm}$) a posypu zirkon Mesh 110.

Pro 2. obal břechky na lihové bázi s plnivem molochit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ Mesh 200 a posyp molochit 30/80 ($d = 0,18 - 0,5 \text{ mm}$).

Pro obaly 3-9. posyp molochit 16/30 ($d = 0,5 - 1 \text{ mm}$) a stejné břechky jako pro druhý obal. Čas sušení mezi obaly byl minimálně 3 hodiny a celkový počet obalů 9.

První 3 obaly byly zhotoveny ručním obalováním, zbylých 6 pak na robotické obalovací lince.

Vytavení vosku z dutiny formy probíhalo v parním bojlerklávu od firmy LBBC při tlaku 9 bar. Po vytavení vosku byla skořepina z důvodů vysušení ponechána 24 hod k temperování. Následně byla skořepina žíhána v plynové žíhací peci od firmy Thermidor po dobu 3 hodin při teplotě 1100°C pro odstranění zbytku vosku a vody a dosažení požadovaných mechanických pevností.



Po ochlazení skořepiny na teplotu okolí (obr.4.1) bylo na formě aplikováno zaizolování a před samotným odléváním znovu vloženo do žíhací plynové pece.

Obr. 4.1 Forma D10-50 před aplikací izolace

4.2 Způsoby tepelného ošetření pomocí izolace

Vhodnou aplikací izolací lze u skořepinových forem docílit:

1. Zmenšení ochlazování při transportu ze žíhací pece na lící pole kokilové komory do doby samotného odlévání (čím je tento okamžik delší, význam zaizolování skořepinové formy vzrůstá)

2. Omezení vzájemného osálávání jednotlivých odlitků na stromečku, pro homogennější teplotní pole odlitku, zabránění vychýlení tepelné osy odlitku mimo osu geometrickou, a tím dosažení symetrie mechanických vlastností

3. Dosáhnutí strmého teplotního gradientu (podélný teplotní gradient = spád teploty v tepelné ose). Pro správné dosazování kovu z nálitku (resp. vtoku) do odlitku je bezpodmínečně nutný teplotní spád směrem ke konci dosazované oblasti – na experimentálních skořepinách teploty v horní části odlitku blíže k nálitku musí být vyšší než teploty ve spodní části. Tato zásada musí být splněna po celé délce

odlitku. V místech, kde je tento teplotní gradient malý nebo dokonce záporný, dochází ke vzniku staženin a ředin.

V praxi se odlévají jak izolované skořepiny, tak i neizolované. Pro izolaci skořepinových forem jsou nejvhodnější hlinitanokřemičité vláknité materiály ve formě textilií s nízkou tepelnou vodivostí, nízkou objemovou hmotností, vysokou tepelnou odolností a snadnou aplikací. Podle potřeby lze izolační účinek zvyšovat použitím více vrstev.

Pro experimentální formy byla použita v PBS standardně používaná izolace Sibal firmy Unifrax (Keraunion Dubí) a to v tloušťkách 6,5 a 13 mm (obr.4.2).



Obr. 4.2 Izolace Sibal na experimentální skořepinové formě lopatek

5 VAKUOVÁ INDUKČNÍ PEC

Experimentální skořepinové formy byly odlity v PBS ve vakuové indukční peci VIM IC 5E firmy ALD Vakuum Technologies (instalované v PBS v roce 2006). Celkový pohled na pec je na obr 5.1.

Tavení a odlévání slitin ze žáropevných slitin niklu legovaných hliníkem a titanem ve vakuu je nezbytností. Tavení ve vakuových indukčních pecích má řadu výhod. Kov je při tavení podroben hlubokému odplynění, dokonalé dezoxidaci díky dlouhé výdrži ve vakuu a přemíchávání lázně obsahuje nepatrné množství nekovových vměstků. Během tavby se ze slitiny odpařují příměsi s vysokým tlakem nasycených par. Ve vakuové indukční peci mohou být vytaveny slitiny prakticky libovolného chemického složení z nejrůznějších vsázkových materiálů.



Obr. 5.1 Celkový pohled na pec VIM IC E5 [13]

Použití vakua dovoluje chránit legury před oxidací a vede k vynikajícím povrchům odlitků, což usnadňuje dokončovací operace. Je možné udržet složení slitin ve velmi úzkých mezích, což vede ke stabilním vlastnostem odlitků. Ve vakuu se rovněž zlepšuje zabíhavost slitin, což dovoluje odlévat velmi složité tenkostěnné odlitky.

Jediným vážným nedostatkem vakuových indukčních pecí je kontakt taveniny s žáruvzdorninou kelímku, což může snížit rafinační efekt tavby ve vakuu a v některých případech může vést ke kontaminaci taveného materiálu.

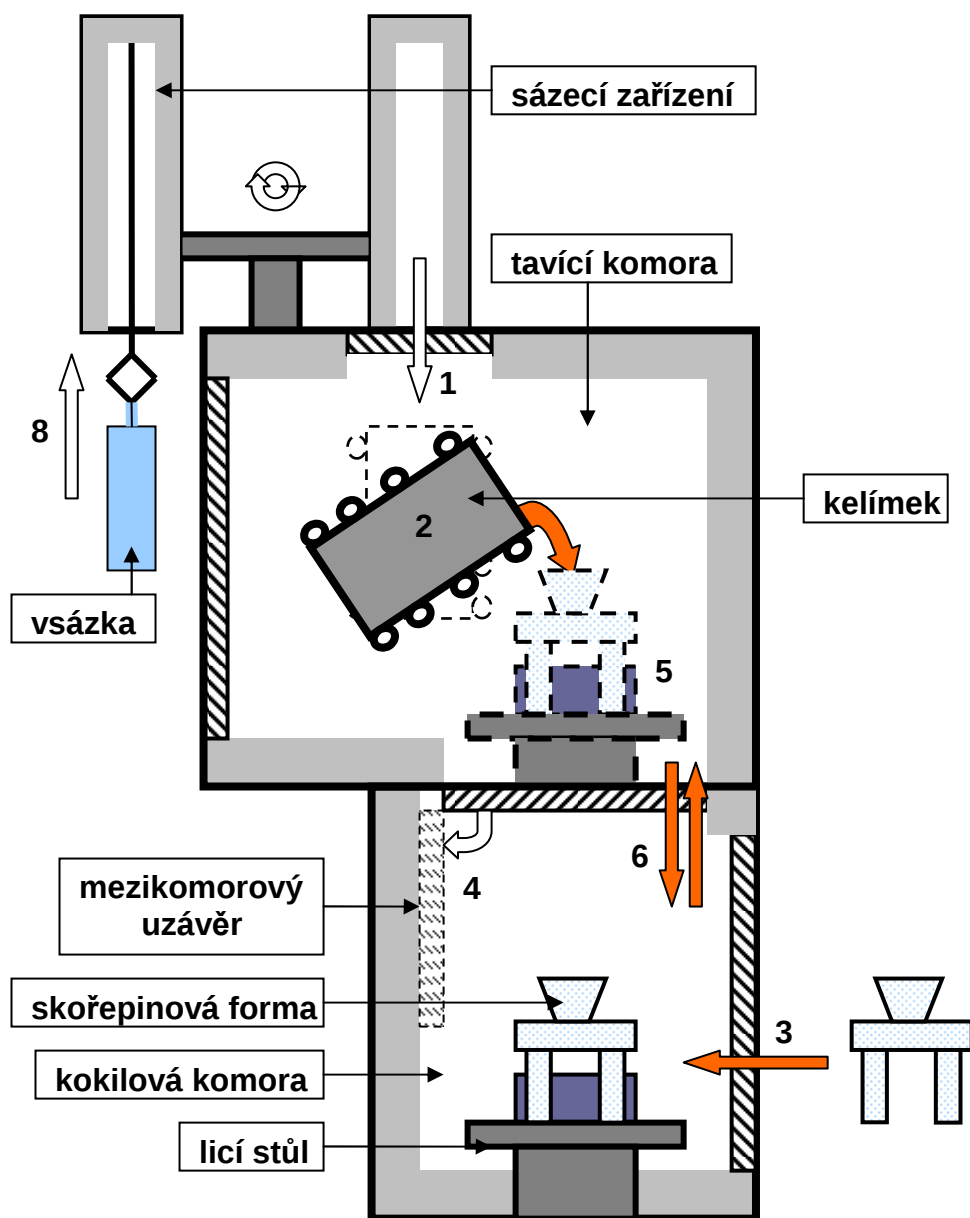
Slévárenské vakuové indukční pece natavují vsázku v podobě ingotů předepsaného složení a vlastností, odlitých v jiném vakuovém tavícím agregátu, zpravidla ve vakuové hutní indukční peci. Během tavby se již neprovádí žádné rafinační pochody.

V současné době existuje množství nejrůznějších konstrukcí vakuových indukčních pecí. Všechny tyto konstrukce spojuje společný princip činnosti. Ve vakuové komoře je pomocí induktoru v žáruvzdorném kelímku natavena vsázka a provedeno odlití odlitků nebo ingotů.

Z technologického hlediska je nejdůležitější dělení vakuových pecí podle způsobu práce a to na:

1. Vakuové pece pracující periodicky – jednokomorové pece – po každé tavbě je provedeno zavzdušnění vakuové komory, komora je otevřena a je z ní vyjmuta odlitá forma

2. Vakuové pece pracující nepřetržitě – dvoukomorové pece – odlévání forem je prováděno bez zavzdušňování tavící komory – tavící kampaň je omezená životností kelímku [14]



Obr. 5.2 Schéma dvoukomorové vakuové indukční slévarenské pece s vertikálním uspořádáním komor

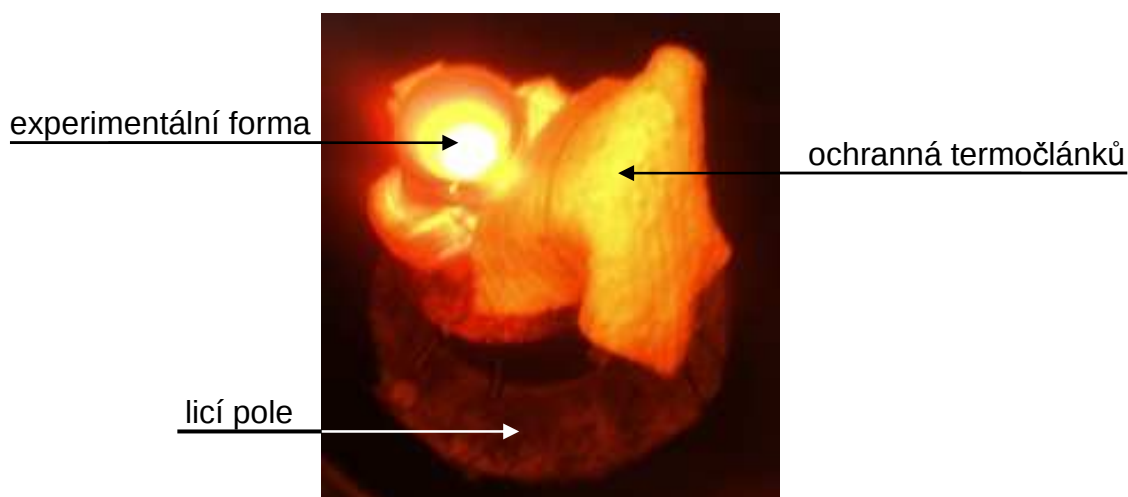
Uspořádání komor pece VIM IC 5E je dvoukomorové vertikální (obr.5.2). Tavicí komora je od kokilové oddělena vakuovým uzávěrem. Obě komory jsou opatřeny vraty. Forma se k lití dopravuje hydraulicky na stole, výšku zdvihu lze regulovat.

Pec je opatřena vsázacím zařízením pro vsázení pod vakuem a ponorným a optickým pyrometrem. Má dvě větve vývěv – jedna, tzv. jemná, která se skládá z difúzní vývěvy, Rootsovy vývěvy a olejové rotační vývěvy, trvale odsávající tavicí komoru na vakuum $3 \cdot 10^{-3}$ mbar, druhá, tzv. hrubá větev, skládající se z Rootsovy vývěvy a olejové rotační vývěvy, střídavě odsávající kokilovou komoru a vsázací zařízení. K peci jsou připojovány vývěvy soustavou tlakových a koncových spínačů. K měření vakua slouží řada přístrojů, připojených ke všem komorách.

Kelímek pece byl z ZrO_2 s objemem 39kg. Jeho naklápění je hydraulické. Výkon generátoru 175kW (frekvence 3000Hz). Pec je vybavena různými induktory pro různou hmotnost vsázky.

Postup práce pece je následující (obr 5.2):

1. Do kelímku je pod vakuem vsazena vsázka
2. Vsázka je natavena a je dosaženo licí teploty
3. Do kokilové komory je vložena vyžíhaná keramická forma
4. Kokilová komora je odsáta a po vyrovnání tlaků otevřen mezikomorový vakuový uzávěr
5. Forma je dopravena k lití a odlita (obr.5.3)
6. Odlitá forma je dopravena zpět do kokilové komory a uzavřen mezikomorový uzávěr
7. Kokilová komora je zavzdušněna
8. Do vsázacího zařízení je vložena nová vsázka a vsázací zařízení odsáto



Obr. 5.3 Experimentální vyžíhaná skořepina na licím poli v tavicí komoře vakuové pece před odléváním

6 ODLÉVANÝ KOV

Pro experimentální zkoušky byla použita slitina na bázi niklu Inconel 713LC (dále jen INC 713LC) tvořící páteřní typ slitin v sortimentu slévárny PBS pro odlévání ve vakuových pecích.

INC 713 patří jako ostatní niklové slitiny určené pro přesné lití metodou vytavitelného modelu k nejsložitějším slitinám co do chemického složení, tak i do technologie výroby. Patří mezi první lité slitiny tzv. I.generace, kde byla při výrobě aplikována vakuová metalurgie.

Výroba odlitků z této slitiny je technologicky zvládnuta v běžném provozu v několika našich slévárnách (PBS Velká Bíteš, a.s, MOTORLET – nyní WALTER Engines a.s., Praha) již přes třicet let. – je prakticky identická s u nás hojně používanou slitinou značenou podle standartu GOST jako LVN-10. [3]

Jedná se o žárovevnu niklovou slitinu určenou pro teplotně a napětově nejvíce exponované součásti. Těžiště jejího použití leží v oboru plynových turbín a stacionárních plynových turbín s dlouhou dobou životnosti (Obr. 6.1).



Obr.6.1 Celolitě kolo turbíny ze slitiny INC 713LC - PBS Velká Bíteš [13]

Slitina INC 713LC je používána do provozních teplot 900°C. Do teplot 850°C si udržuje vysoké pevnosti, po překročení této teploty pevnost rychle klesá. V korozně velmi agresivních prostředí jsou povrchy odlitků někdy opatřovány žárovzdornými nástřiky. Spodní teplotní hranicí použitelnosti je z ekonomického hlediska teplota okolo 550°C, pod kterou mohou být s výhodou použity slitiny levnější a technologicky méně náročné. (tab. 6.3) [15]

Z důvodů obtížné obrobiteľnosti součástí z této slitiny je nutné odlévání z minimálními přídávky na opracování, proto typickou technologií pro výrobu odlitků je technologie přesného lití metodou vytavitelného modelu v kombinaci vakuové metalurgie. Mezi technologické přednosti patří použití v tepelně nezpracovaném stavu. [3]

INC 713LC je strukturně stabilní komplexně legovaná slitina (tab.6.1), u které je využito hned několika zpevňujících mechanismů. Základ této slitiny tvoří austenitická matrice Ni substitučně zpevněná zejména Mo a vytvrzujícími precipitáty tvořenými intermetalickými sloučeninami, karbidy a boridy, podílející se na dispersním zpevnění uvnitř a na hranicích zrn. Z důvodů nízkouhlíkové modifikace jsou karbidy obsaženy zřídka a zpevnění karbidy není u této slitiny z hlediska žárupevnosti rozhodující (LC = low carbon). [16]

Snížení obsahu uhlíku způsobuje posun teploty solidu a likvidu k vyšším teplotám a zlepšení některých materiálových charakteristik (zejména zvýšení plasticity a snížení náchylnosti k tvorbě mikroporozity odlitků. (tab. 6.2)

V této slitině jsou obsaženy i prvky s velkou afinitou ke kyslíku jako Zr, Ti, Al, a proto není možné tyto slitiny tavit a odlévat na vzduchu, ale pouze s využitím vakuové metalurgie a vakuového lití. Vzhledem k vysokému obsahu Al a Ti není svařitelná běžnými způsoby tavného svařování z důvodu nebezpečí vzniku trhlin poblíž svarové oblasti. Dobré provozní zkušenosti jsou s přivařování rotorových disků k ocelovým hřídelím pomocí svařování třením, pro nerozebíratelné spojování částí ze slitin INC 713LC je vhodné difúzní svařování nebo pájení ve vakuu pájkami typu Ni-Cr-B-Si. [3]

Tab. 6.1.: Chemické složení slitiny INC 713LC: [17]

prvek	střední obsah [hmot.%]	přípustné rozmezí [hmot.%]
C	0,05	0,03 - 0,07
Cr	12	11,00 - 13,00
Mo	4,5	3,80 - 5,20
Nb+Ta	2	1,50 - 2,50
Al	5,9	5,50 - 6,50
Ti	0,6	0,40 - 1,00
B	0,01	0,005 - 0,015
Zr	0,1	0,05 - 0,15
Si	X	max 0,50
Mn	X	max 0,25
Fe	X	max 0,50
Cu	X	max 0,50
S	X	max 0,015
Ni	zbytek	zbytek

Tab. 6.2.: Fyzikální vlastnosti slitiny INC 713LC a INC 713 C: [16]

Slitina	T _{likvidu} [°C]	T _{solidu} [°C]	Hustota [kg/dm ³]
INC 713 LC	1288	1321	8,01
INC 713 C	1260	1288	7,91

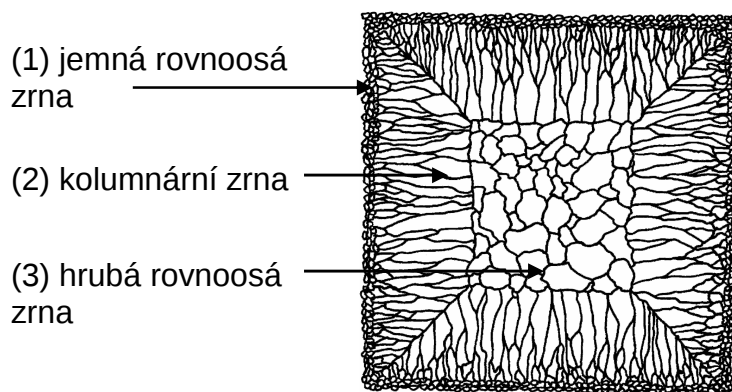
Tab. 6.3.: Mechanické vlastnosti slitiny INC 713 v závislosti na teplotě: [3]

Teplota [°C]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [°C]	A [%]	E [GPa]
21	895	750	15	195
540	895	760	11	170
650	1080	785	11	165
760	950	760	11	160
870	750	580	12	150
980	470	305	22	140

7 KRYSTALIZACE NIKLOVÝCH SLITIN

Krystalizace je fázová přeměna (kapalná fáze na fázi tuhou) s růstem řízeným přenosem tepla, na které závisí výsledné vlastnosti niklových slitin. Mechanismus krystalizace je charakterizován vznikem stabilních zárodků a jejich následným růstem. Základní podmínkou pro uskutečnění tohoto mechanismu je dostatečně velké přechlazení taveniny. [18]

Studium krystalizace niklových slitin má velký význam, neboť struktura odlitku má zásadní vliv na řadu materiálových vlastností. Je proto zkoumán mechanismus vzniku různých typů struktur s cílem řídit proces krystalizace tak, aby bylo dosaženo požadované struktury odlitku a s tím spojených vlastností.



Obr. 7.1 Obecná makrostruktura řezu odlitkem [14]

Obvykle lze v makrostruktuře příčného řezu odlitkem pozorovat tři oddělené oblasti[14]:

1. Oblast přiléhající ke stěně formy, jež je tvořena jemnými rovnoosými zrny s náhodnou orientací:

- zrna nukleují na stěně formy, jedná se o heterogenní nukleaci vyvolanou tepelným přechlazením taveniny přiléhající ke stěně formy
- rozsah nukleace je určen tepelnými podmínkami u stěny, účinností stěny jako podložky pro heterogenní nukleaci a přítomností zárodků
- nukleační teorie vzniku této oblasti je doplněna o teorii multiplikace dendritů založené na odtavování os dendritů v důsledku fluktuace růstu vyvolané konvekcí taveniny

2. Oblast kolumnárních zrn, orientovaných paralelně s odvodem tepla stěnou formy:

- zrna se vyvíjí ze zárodků z první oblasti, vykazují při tom silnou přednostní krystalografickou orientaci odpovídající orientaci dendritického růstu
- osy zrn jsou rovnoběžné s maximálním teplotním gradientem
- na vzniku přednostního směru růstu se současně podílí kinetika transportu hmoty na fázové rozhraní a anizotropie povrchové energie

3. Středová oblast poměrně velkých rovnoosých zrn:

- zrna mají obvykle nahodilou orientaci
- příznivé podmínky pro jejich vznik jsou nízká lící teplota a vysoký obsah legur
- podle Chalmerse vznik těchto zrn je zapříčiněn heterogenní nukleací, ke které dochází vlivem konstitučního přechlazení, později zastával názor o vzniku ze zárodků vzniklých na stěnách formy během lití, které přežily přehřátí a byly prouděním přeneseny do středu odlitku.

Dle Zemčíka je nejdůležitějším faktorem určující následné vlastnosti rozsah oblastí kolumnárních a rovnoosých zrn v odlitku.

Je-li cílem řízení krystalizace získání odlitku s izotropními vlastnostmi, je nutné získat jemnozrnnou rovnoosou strukturu. Jsou-li na druhé straně požadovány anizotropní vlastnosti (lopatky spalovacích turbín), je zapotřebí podpořit podmínky příznivé růstu kolumnárních zrn. **[14]**

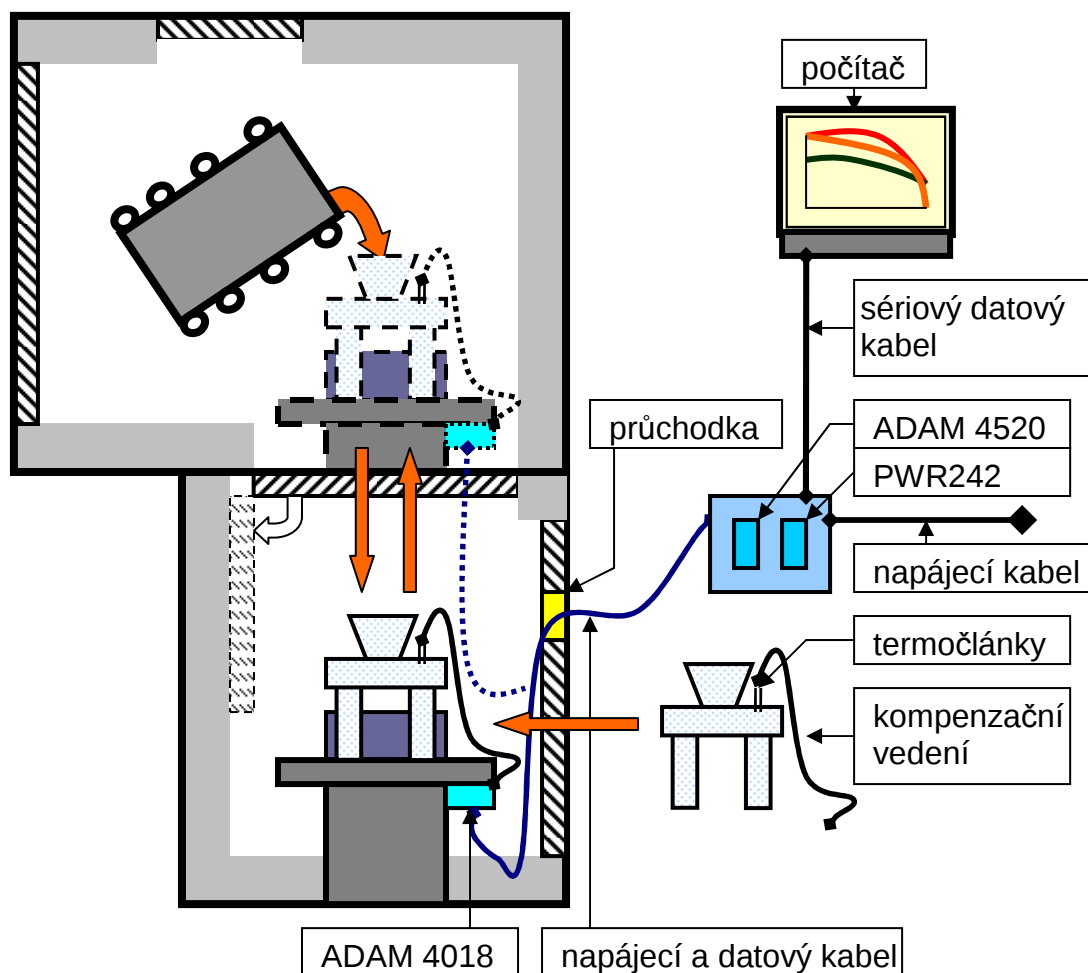
Obecně se jemným rovnoosým strukturám dává přednost při nižších teplotách, kde se požaduje odolnost vůči únavě a pevnost v tahu. Při vyšších teplotách je tečení omezujícím faktorem a dává se přednost velkým zrnům, zejména pak velkým kolumnárně usměrněným zrnům. Materiál s kolumnárními zrny je výhodnější při tepelné námaze a má vyšší rázové a creepové vlastnosti z důvodů vyloučení příčných hranic zrn. **[3]**

8 SYSTÉM MĚŘENÍ TEPLOT VE VAKUOVÉ PECI

Realizace měření teplot ve vakuové peci představuje poměrně značný technický problém, při němž bylo nutné vyřešit přenos dat z termočlánků mezi formou a převodníkem dat, který je v prostředí vakuové pece a musí střídavě pracovat v prostředí atmosférického tlaku a prostředí vakua. Z tohoto důvodu bylo nutné použít převodník neobsahující součástky, které by se ve vakuu poškodily (kondenzátory, LED stupnice,...).

Druhým problémem byl přenos dat mezi převodníkem v peci a řídicím modulem mimo pec, který musel být propojen datovým a napájecím kabelem průchodem konstrukcí pece.

Po řadě konzultací s firmami, dodavateli příslušných systémů, byl navržen a realizován systém měření za pomoci modulů ADAM firmy Advantech a pro průchod datového a napájecího kabelu vyvinuta v PBS speciální těsnící zátka (obr.8.1).



Obr. 8.1 Schéma měření teplot ve vakuové peci

Pro všechna měření teplot byly použity termočlánky typu S $\varnothing 0,35$ mm (PtRh10+, Pt–; vhodné pro měření teplot v rozmezí 0 – 1550°C (krátkodobě až 1750°C [19]) v ochranných dvoukapilárách $\varnothing 2,8$ mm, který byly zasunuty do křemenných trubic $\varnothing 4$ mm ve vyžíhané skořepinové formě (obr.8.2). Termočlánky byly opatřeny keramickými mikrokonektory pro napojení kompenzačního vedení.



Obr. 8.2 Umístění termočlánků ve formě



Obr. 8.3 Umístění modulu ADAM 4018 na spodní straně licího stolu v liště

Modul ADAM 4018 je 16-ti bitový analogový vstupní modul, který umožňuje naprogramovat vstupní rozsahy všech kanálů. Funguje jako A/D převodník pro obvyklé typy termočlánků. Podmínkou je vždy použití termočlánků stejného typu na všech kanálech. Vzorkovací rychlost je 10 kanálů za sekundu. Modul má integrovaný low pass filtr, tudíž může být použit v blízkosti indukčního pole cívky. Modul byl uchycen v přivařené liště na spodní straně licího stolu z důvodu jeho ochrany před kontaktem s kovem a malé teplotní expozici [20] (obr.8.3).

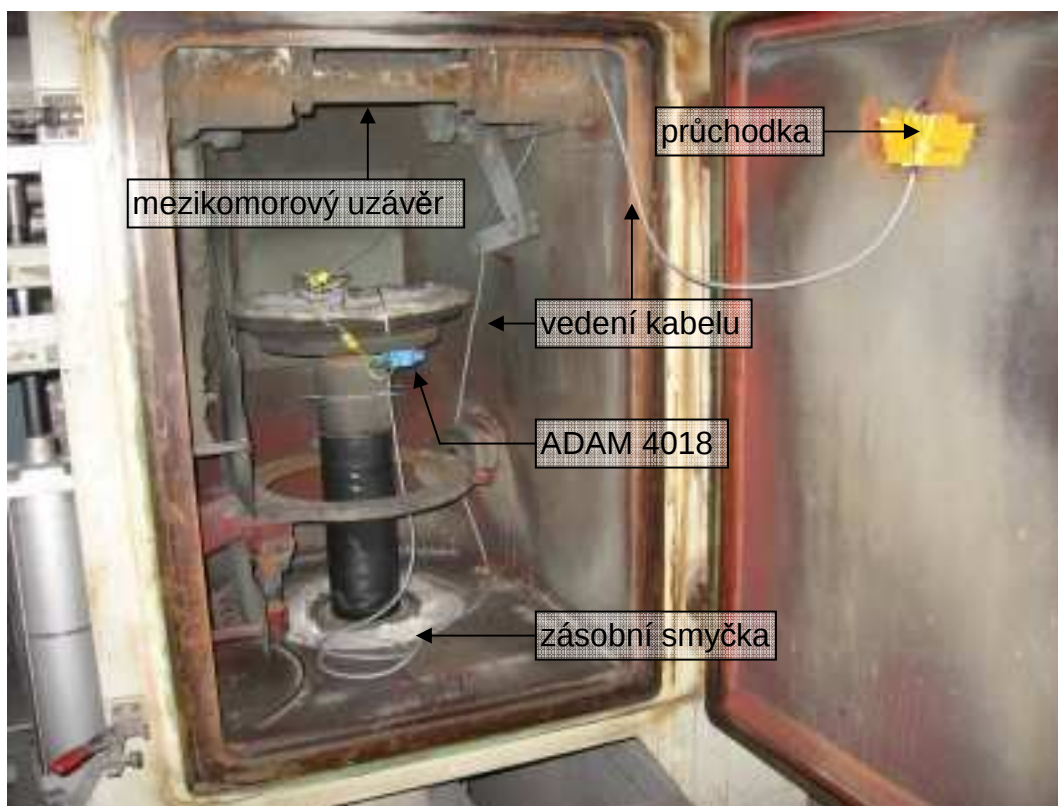
Pro napájení modulu ADAM 4018 a přenosu dat bylo nutné zajistit propojení s modulem ADAM 4520 umístěným mimo pec. Pro průchod konstrukcí pece bylo vybráno vhodné místo – a to ve vratech kokilové komory, kde je jinak umístěn manometr. V PBS byla vyvinuta v několika verzích speciální vakuově těsná zátka ze silikonové gumy Lukopren N (firma Lučební závody Kolín), ve které byly zality 4 vodiče (2 pro napájení, 2 pro přenos dat) a umístěna do průchodky po manometru (obr.8.4).



Obr. 8.4 Vakuově těsná zátka se 4 vodiči v průchodce po manometru

Propojení ADAMA 4018 s ADAMEM 4520 muselo respektovat zavírání a otevírání vrat kokilové komory, pohyb licího stolu z kokilové komory do tavící a zpět a i limitovaný prostor komor. Toto propojení je poměrně technicky náročné a kabel je v peci nutné vést tak, aby nedošlo k jeho zachycení při pohybu stolu, při otevírání a zavírání mezikomorového uzávěru (ať už samotným uzávěrem, či jeho otevíracím pákovým mechanismem), a aby se při pohybu stolu dolů kabel spolehlivě spustil do kokilové komory a nezablokoval případně uzavření mezikomorového uzávěru. Po prostudování všech

možností vedení kabelu byla nalezena trasa a změřena potřebná délka kabelu k pohybu stolu, zásobní smyčka pro tento pohyb byla vytvořena volným smotáním na dně kokilové komory (obr.8.5).



Obr. 8.5 Umístění napájecího a datového kabelu

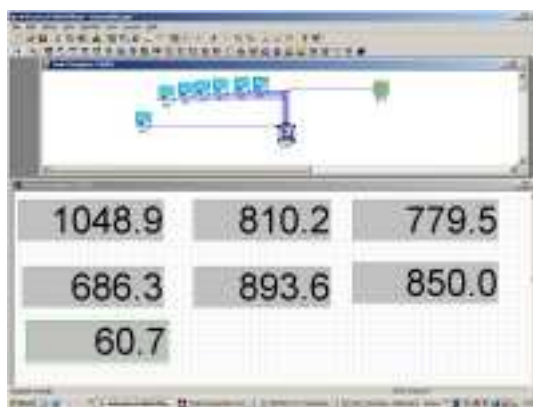
Modul ADAM 4520 je konvektor RS-232/RS485 s napětovou ochranou do 3000V. Moduly ADAM 4018 a ADAM 4520 jsou propojeny pouze jedním dvou vodičovým stíněným datovým kabelem s průřezem $0,35 \text{ mm}^2$. Propojení mezi modulem ADAM 4520 a počítačem je standardním sériovým datovým kabelem [20].

Pro napájení obou modulů ADAM slouží modul PWR242, který vstupní napětí 230V transformuje na napětí 24V. Moduly ADAM 4520 a PWR242 byly instalovány v boxu s příslušnými konektory v blízkosti počítače (obr.8.6).



Obr. 8.6 Box s moduly ADAM 4520 a PWR242

Pro záznam měření na počítači byl sestaven program pomocí objektového programování v programu Advantech ADAMView 4.0 (Obr.8.7) - modulu Builder a nastaven příslušný typ termočlánků. Hodnoty teplot program ukládá do textového souboru.



Obr. 8.7 Prostředí programu ADAMView

8.1 Průběh měření teplot experimentálních skořepin

Před každým odléváním byly zaizolované skořepinové formy žíhány v plynové žíhací peci Termidor po dobu nejméně jedné hodiny. Po vyjmutí ze žíhací pece byly skořepiny umístěny do speciálně vyrobené ochranné plechové nádoby (obr.8.8).

Z důvodu stísněných prostor kokilové komory vakuové pece bylo nutné termočlánky i s kompenzačním vedením do experimentálních skořepin instalovat mimo pec (obr.8.11). Aby se měření přiblížilo co nejvíce skutečným podmínkám odlévání, bylo snahou instalaci termočlánku provést v co nejkratším čase.



Obr. 8.8 Ochranná plechová nádoba

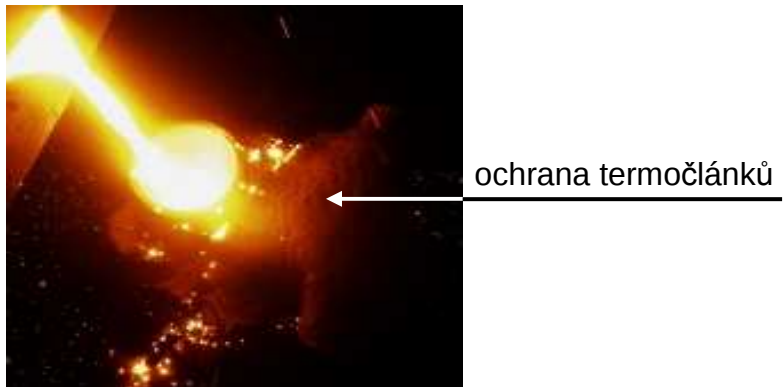


Obr. 8.9 Připojení kazetového konektoru do modulu ADAM 4018

Po umístění všech termočlánků byla skořepina v nádobě přenesena na lící stůl kokilové komory a kompenzační vedení připojeno k modulu ADAM 4018 pomocí kazetového konektoru (obr.8.9), ve kterém byli zaústěny všechny konce kompenzačního vedení. Propojením došlo k zaznamenávání hodnot na počítači. Po uzavření vrat kokilové komory byla komora odsáta.

Při vyrovnání vakua obou komor došlo k otevření mezikomorového uzávěru, lící stůl se skořepinou v ochranné nádobě vyjel do tavící komory, došlo k odlití (termočlánky s kompenzačním vedením byly ve směru proudu chráněny izolací sibal proti rozstříku a polítl kovem (obr.8.10), skořepina byla spuštěna do výchozí pozice, mezikomorový uzávěr uzavřen a kokilová komora zavzdušněna a otevřena.

Po ztuhnutí všech odlitků ve formě bylo měření zastaveno, termočlánky demontovány a skořepina z kokilové komory vyjmuta.



Obr. 8.10 Odlévání experimentální skořepiny ve vakuové peci

Celkem bylo odlito a teplotně naměřeno 7 experimentálních skořepinových forem. Ty lze rozdělit do tří etap:

1. skořepinové formy D10-50 – 2 měření s izolací pouze rozvodného kroužku (KRIZ iz)
– 1 měření s izolací rozvodného kroužku a válců po obvodu skořepiny (CEL iz)
2. skořepinové formy 3xD50 – 2 měření se stejným typem zaizolování
3. skořepinové formy lopatek – 1 měření s dvoustupňovou izolací
– 1 měření s jednostupňovou izolací

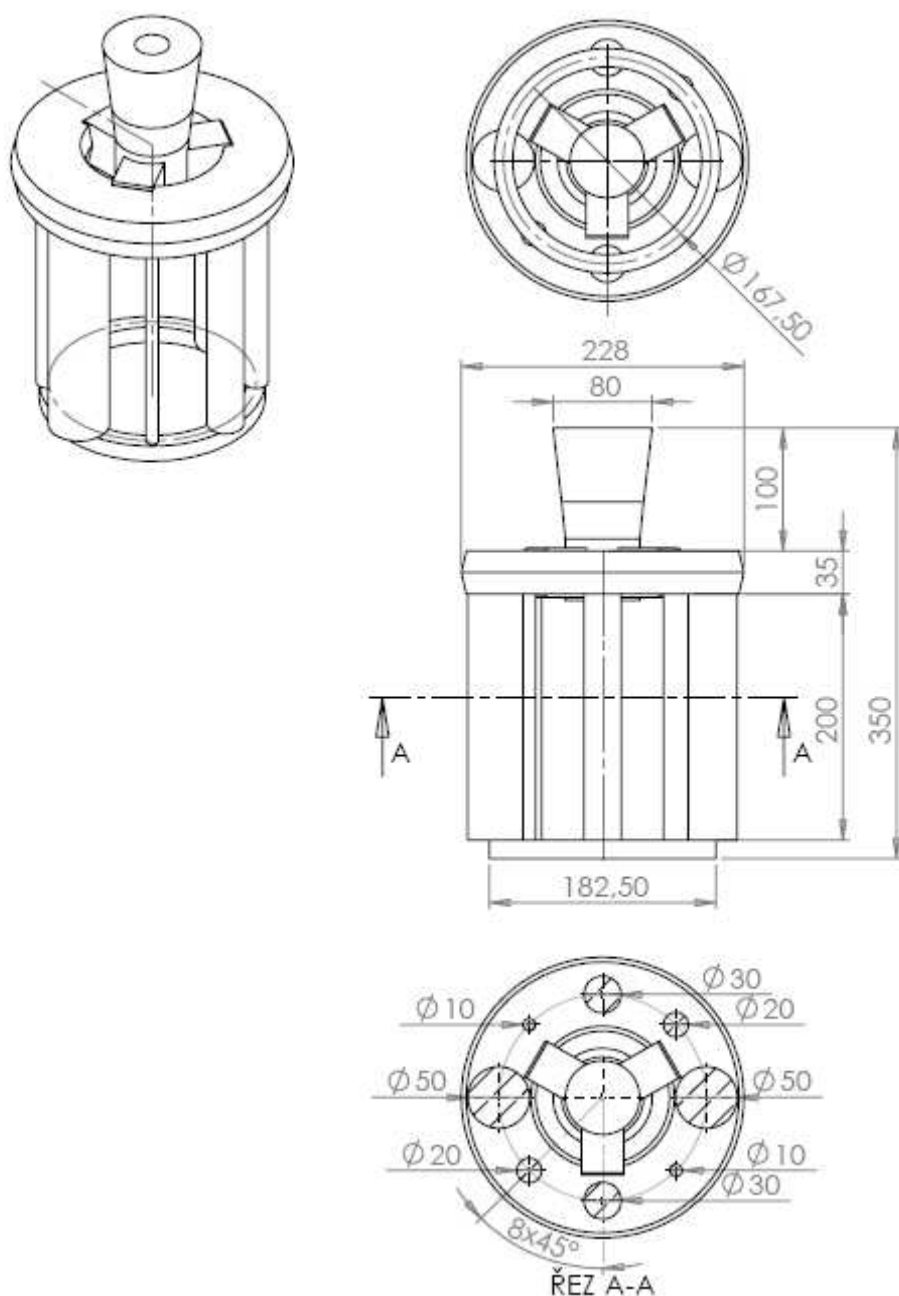


Obr. 8.11 Instalace termočlánků do skořepiny D10-50

9 EXPERIMENTÁLNÍ FORMY D10-50

Pro ověření vlivu rychlosti tuhnutí odlitků různých průměrů byla navržena skořepinová forma tvořená 8 válcovými odlitky průměrů $\varnothing 10$, 20 , 30 , 50 mm a délkou 200 mm, umístěných ve svislé poloze na rozváděcím kroužku ve tvaru mezikruží s centrálním vtokem v ose stromečku. Pro zpevnění soustavy odlitků na stromečku bylo použito rozváděcího kroužku i na spodní straně skořepiny. Označení formy D10-50.

Geometrické uspořádání je na obr. 9.1.



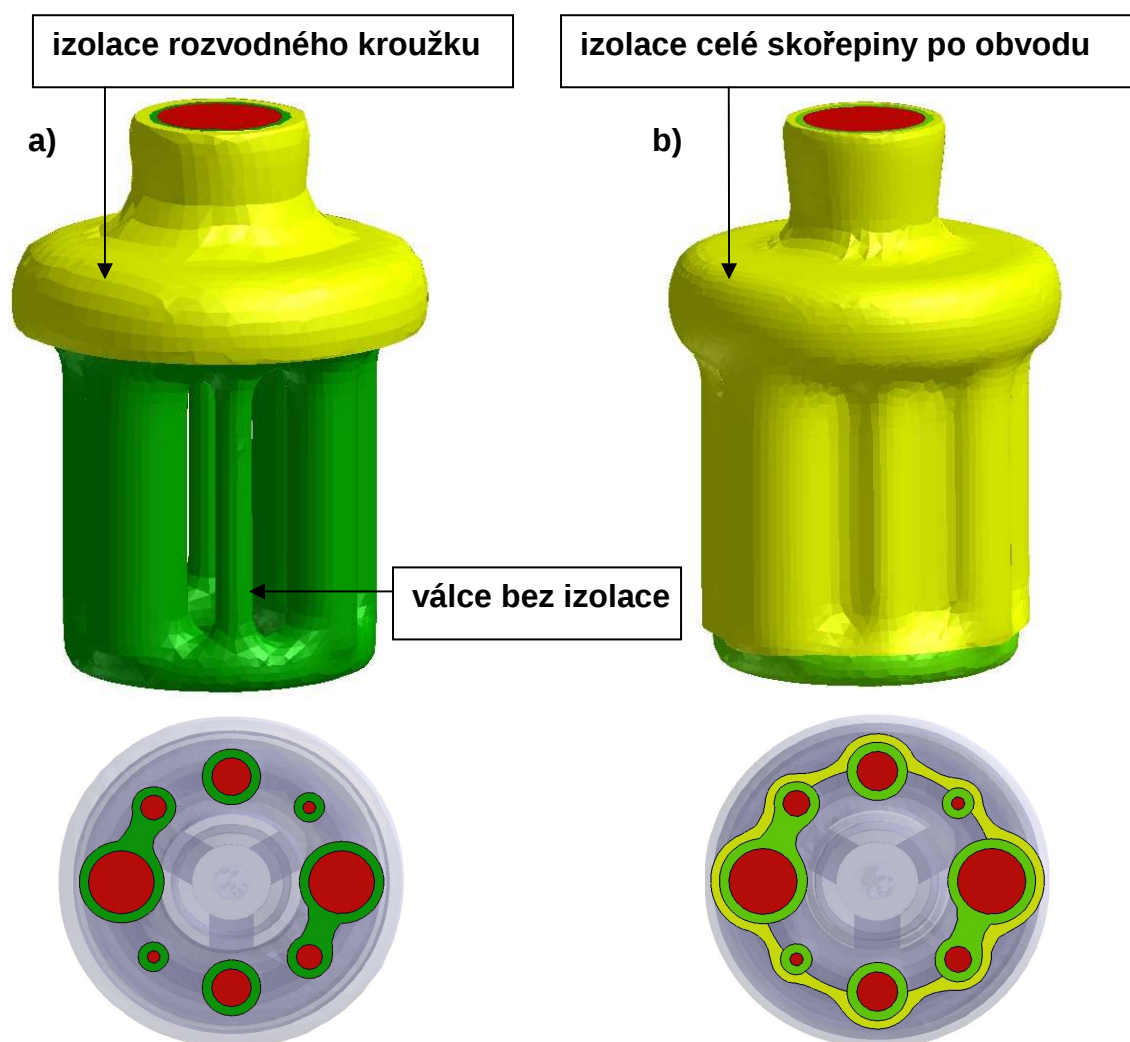
Obr.9.1. Schéma uspořádání zkušební formy D10-50

9.1 Způsoby tepelné izolace skořepiny D10-50

Izolace skořepiny D10-50 byla provedena ve dvou variantách (obr.9.2):

- a) izolován rozvodný kroužek a válce ponechány bez izolace (KRIZ iz) (obr. 9.6)
- b) izolován rozvodný kroužek a válce izolovány po obvodu skořepiny (CEL iz) (obr. 9.8)

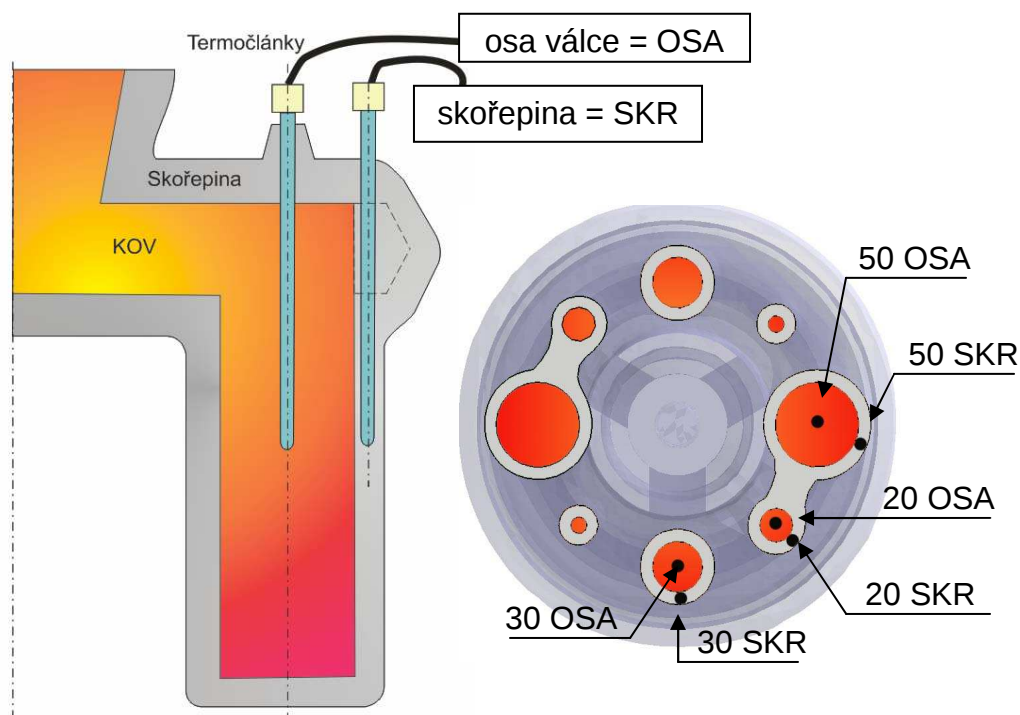
Izolace byla provedena jednou vrstvou tkaninou Sibral tloušťky 6,5 mm. Tento způsob izolace byl zvolen pro srovnání teplotních režimů odlitků různého průřezu se stejným typem izolace, resp. bez izolace.



Obr. 9.2 Způsob tepelného ošetření experimentálních skořepin D10-50

9.2 Průběh teplot skořepin D10-50

Byly uskutečněny celkem tři měření této skořepiny, dvě měření KRIZ iz a jedno měření CEL iz. Termočlánky byly umístěny tři v ose válců pro měření teploty kovu a tři ve skořepině a to v průměrech 50, 30, 20 mm v jedné čtvrtině od horního čela válců. Celkové uspořádání termočlánků je zřejmé z obr. 4.1 a 9.3.



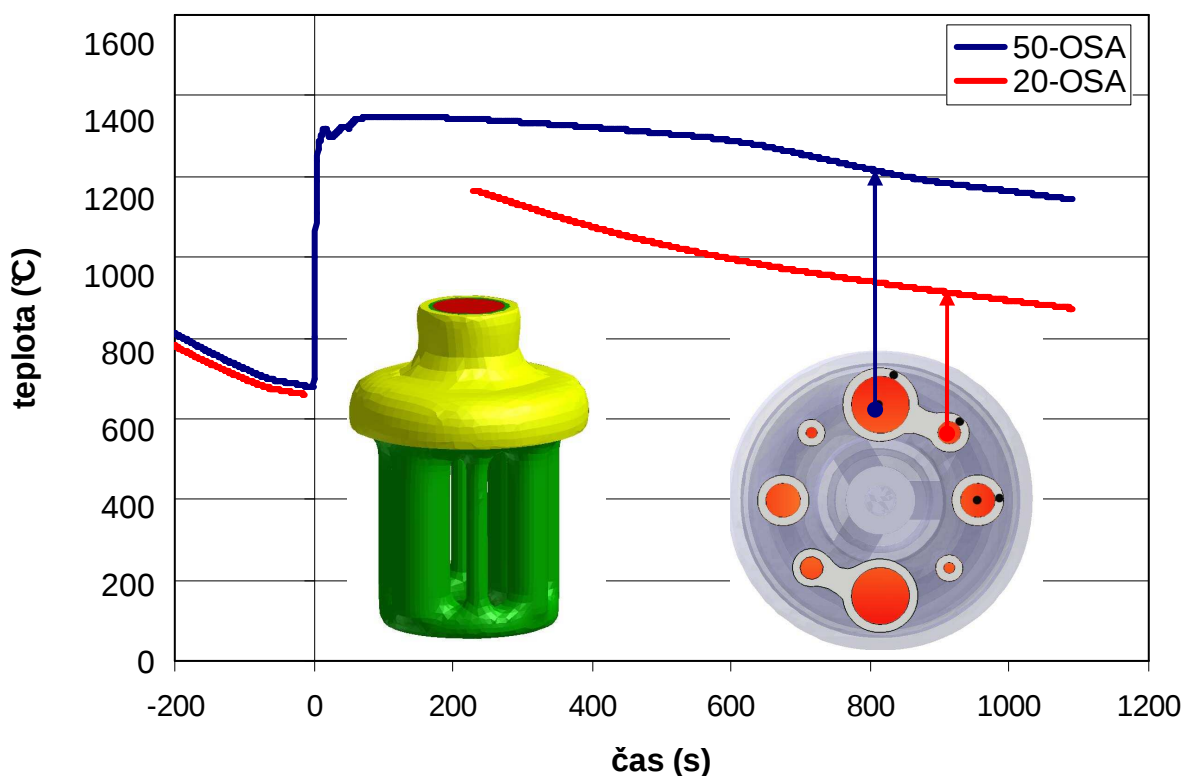
Obr. 9.3 Schéma umístění termočlánků ve skořepině 3xD50

Podmínky měření jsou uvedeny v tab. 9.1, 9.2 a 9.3, grafický průběh teplot v obr. 9.4, 9.5, 9.7, 9.8, 9.10 a 9.11.

Tab. 9.1.: Teplotní a časový režim při 1. měření skořepiny D10-50 KRZ iz:

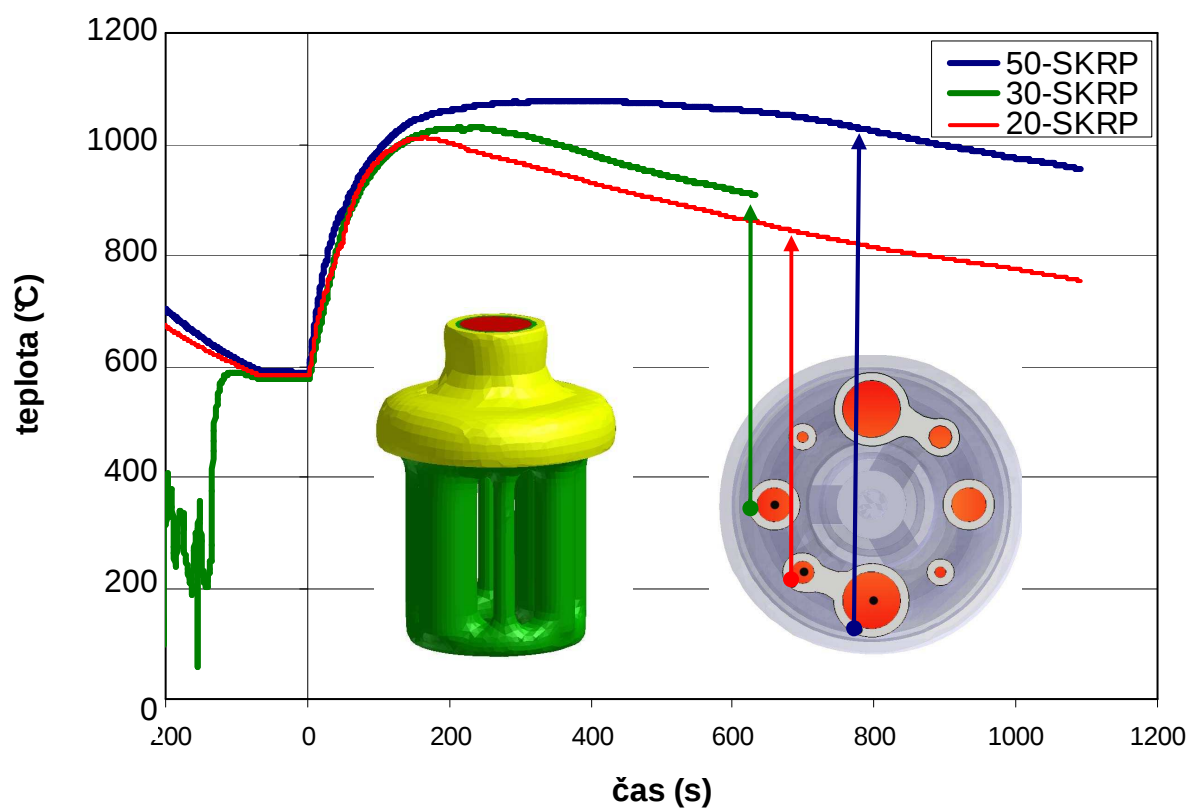
1. měření – D10-50 KRIZ iz	
Teplota žíhání skořepiny	1100°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1360°C
Tlak v tavící komoře	$3 \cdot 10^{-3}$ mbar
Tlak při odlévání do formy v propojených komorách	$8 \cdot 10^{-2}$ mbar
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	278 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	413 s

1. měření D10-50 KRIZ iz - kov



Obr. 9.4 Průběh teplot kovu při 2.měření formy D10-50 KRIZ iz
(Pozn. Porucha termočláunku 30-OSA, částečně 20-OSA)

1. měření D10-50 KRIZ iz - skořepina



Obr. 9.5 Průběh teplot skořepiny při 2.měření formy D10-50 KRIZ iz

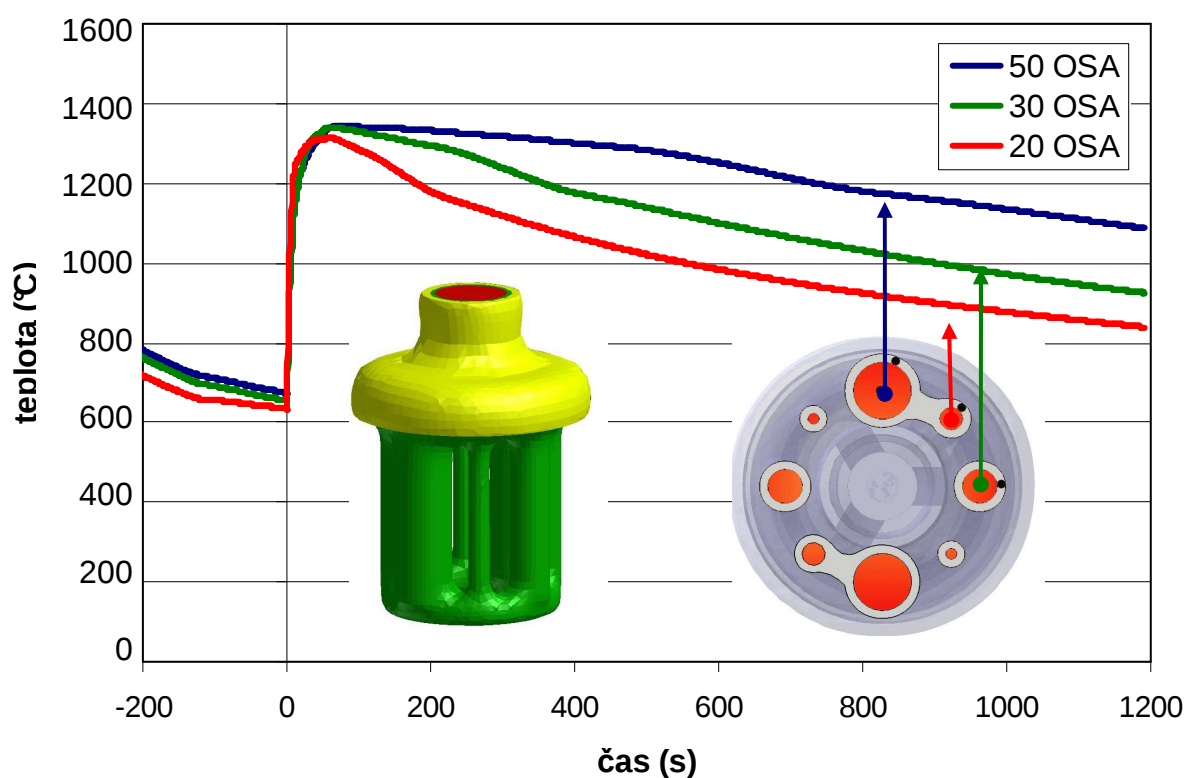


Obr. 9.6 Izolace formy D10-50 KRIZ iz

Tab. 9.2.: Teplotní a časový režim při 2. měření skořepiny D10-50 KRIZ iz:

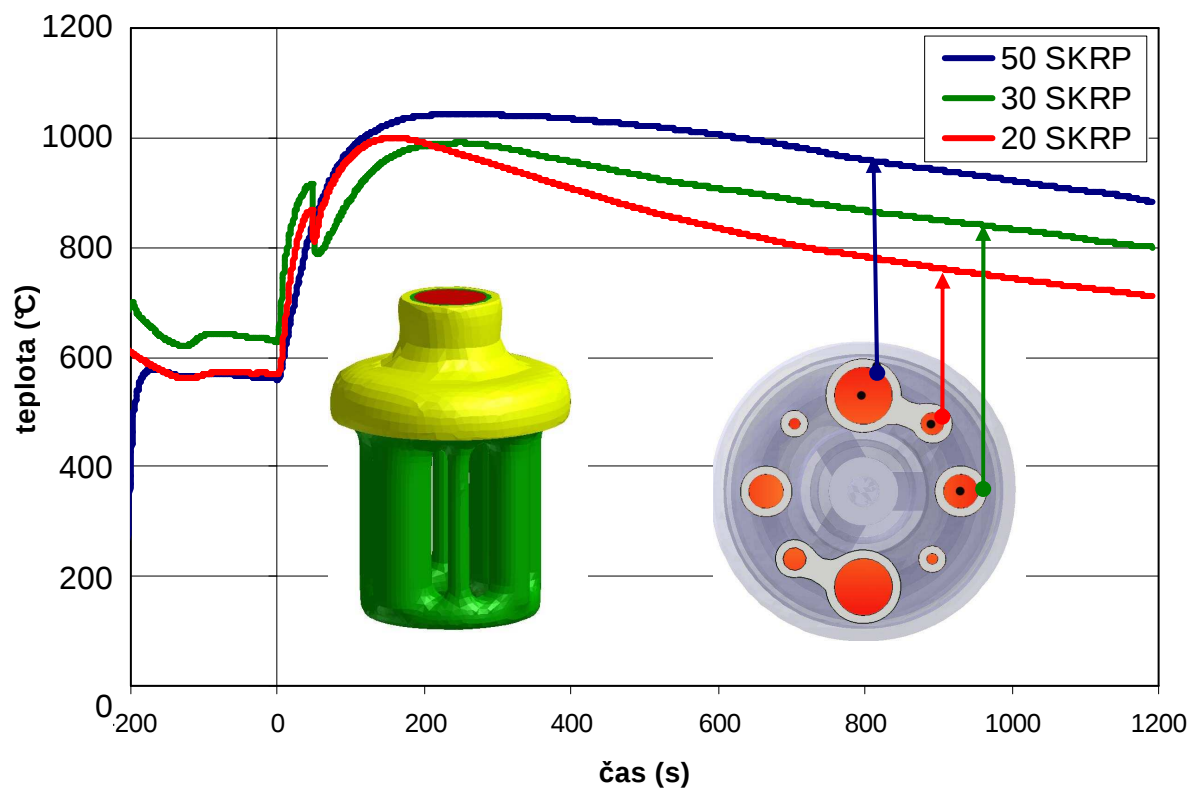
2. měření – D10-50 KRIZ iz	
Teplota žíhání skořepiny	1050°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1360°C
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	258 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	387 s
Doba od odlití do zavzdušnění kokilové komory	33 s

2. měření D10-50 KRIZ iz - kov



Obr. 9.7 Průběh teplot kovu při 2.měření formy D10-50 KRIZ iz

2. měření D10-50 KRIZ iz - skořepina



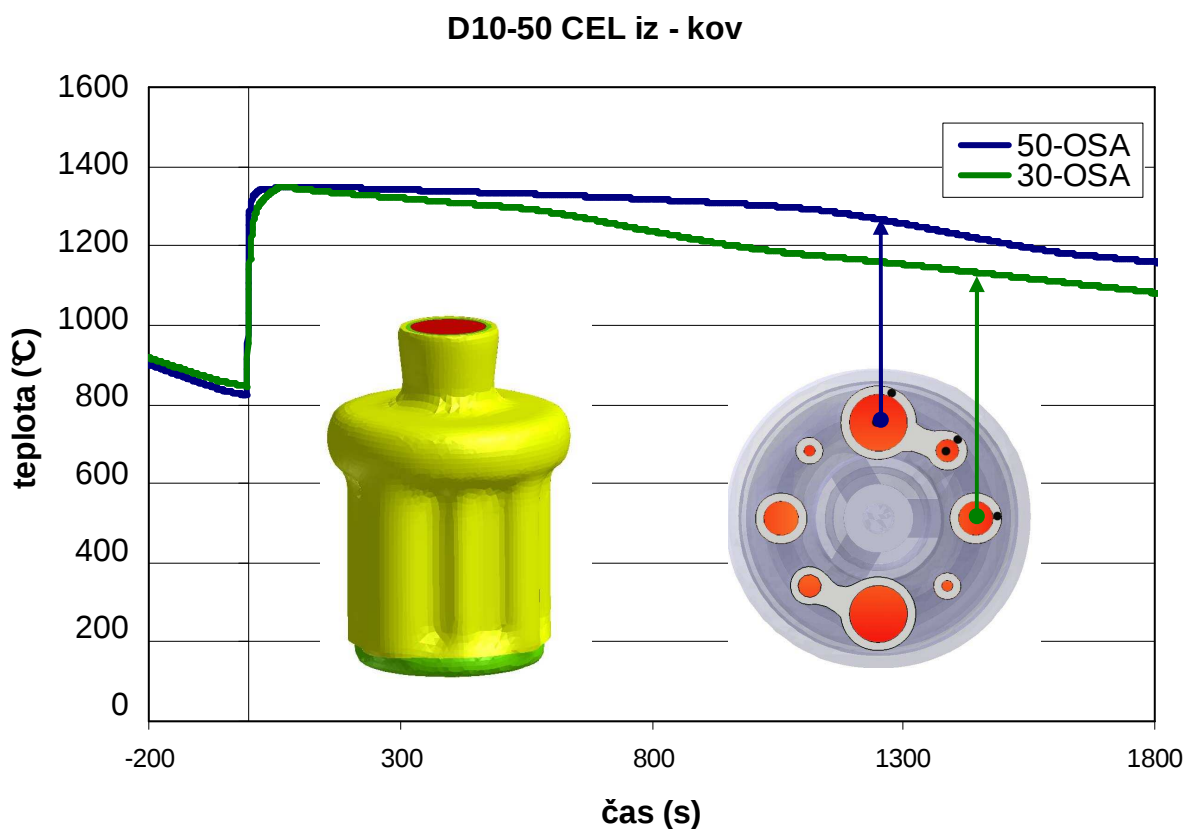
Obr. 9.8 Průběh teplot skořepiny při 2.měření formy D10-50 KRIZ iz



Obr. 9.9 Izolace formy D10-50 CEL iz

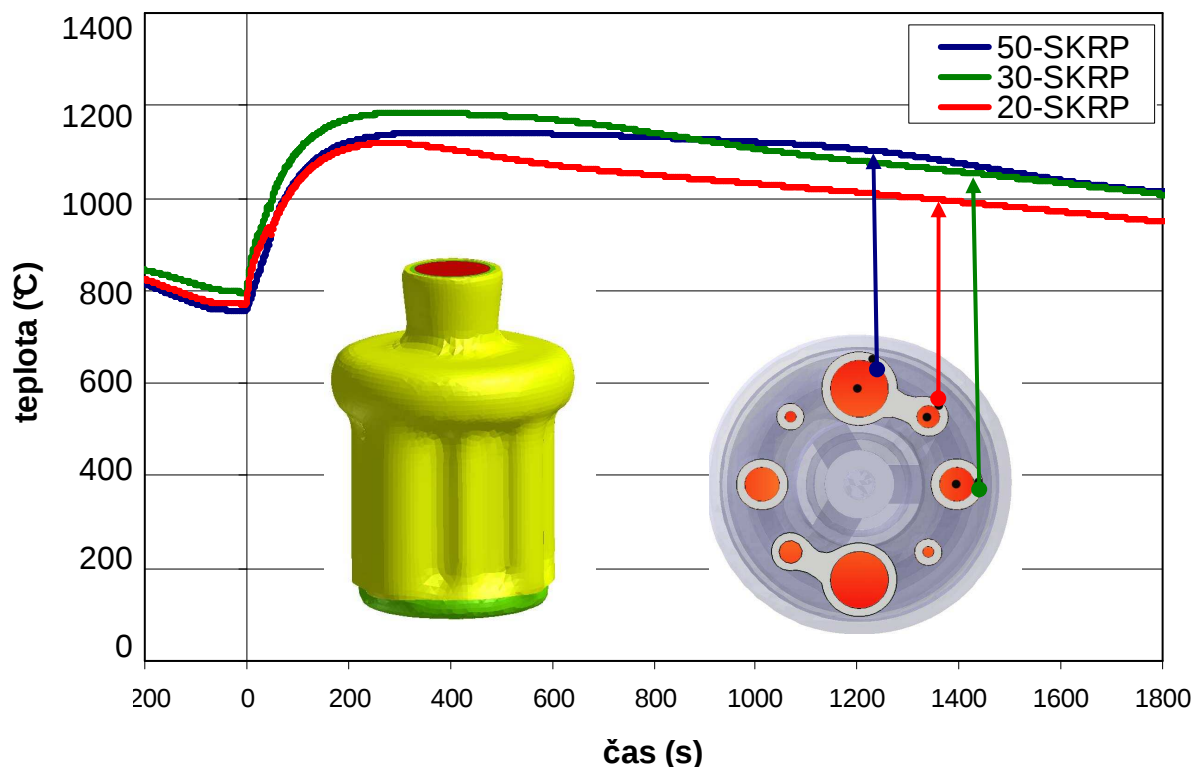
Tab. 9.3.: Teplotní a časový režim při měření skořepiny D10-50 CEL iz:

D10-50 CEL iz	
Teplota žíhání skořepiny	1100°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1360°C
Tlak v tavící komoře	$1,7 \cdot 10^{-3}$ mbar
Tlak při odlévání do formy v propojených komorách	$2 \cdot 10^{-2}$ mbar
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	457 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	546 s



Obr. 9.10 Průběh teplot kovu formy D10-50 CEL iz
(Pozn. Porucha termočláňku 20-OSA)

D10-50 CEL iz - skořepina



Obr. 9.11 Průběh teplot skořepiny formy D10-50 CEL iz

9.3 Diskuze výsledků průběhu teplot skořepin D10-50

Porovnáním teplot kovu forem D10-50 CEL iz a KRIZ iz (2.měření) ve válcích $\varnothing$ 50 mm (obr. 9.14) bylo zjištěno, že izolace tloušťky 6,5mm po obvodu skořepiny výrazně prodlužuje dobu tuhnutí - přibližně na dvojnásobek oproti skořepině izolované pouze s rozvodným kroužkem (čas konce tuhnutí: KRIZ $_{\varnothing 50(1.měř)}$ = 830 s; KRIZ $_{\varnothing 50(2.měř)}$ = 740 s; CELiz $_{\varnothing 50}$ = 1560 s).

Ve válcích $\varnothing$ 30 mm (obr. 9.15) je čas tuhnutí téměř 2,5krát delší (čas konce tuhnutí: KRIZ $_{\varnothing 30(2.měř)}$ = 370 s; CELiz $_{\varnothing 30}$ = 930s).

Pro válce $\varnothing$ 20 mm nelze poměr stanovit pro poruchu termočlánku CELiz 20-OSA (KRIZ $_{\varnothing 20(2.měř)}$ = 180 s), ale lze očekávat hodnotu poměru vyšší než pro $\varnothing$ 30 mm.

Použití izolace vede ke snížení rozdílů rychlosti tuhnutí tlustých a tenkých profilů odlitku. Vliv delší doby tuhnutí se však může nepříznivě projevit na struktuře odlitků, což je nutné ověřit metalograficky a měřeními mechanických vlastností.

Izolace formy po obvodu (CEL iz) vede k významnému snížení rychlosti chladnutí vyžíhané skořepiny před litím přibližně na poloviční hodnotu (rychlost chladnutí vyžíhané skořepiny CELiz = 0,5°C/s) oproti chladnutí formy (KRIZ iz), která

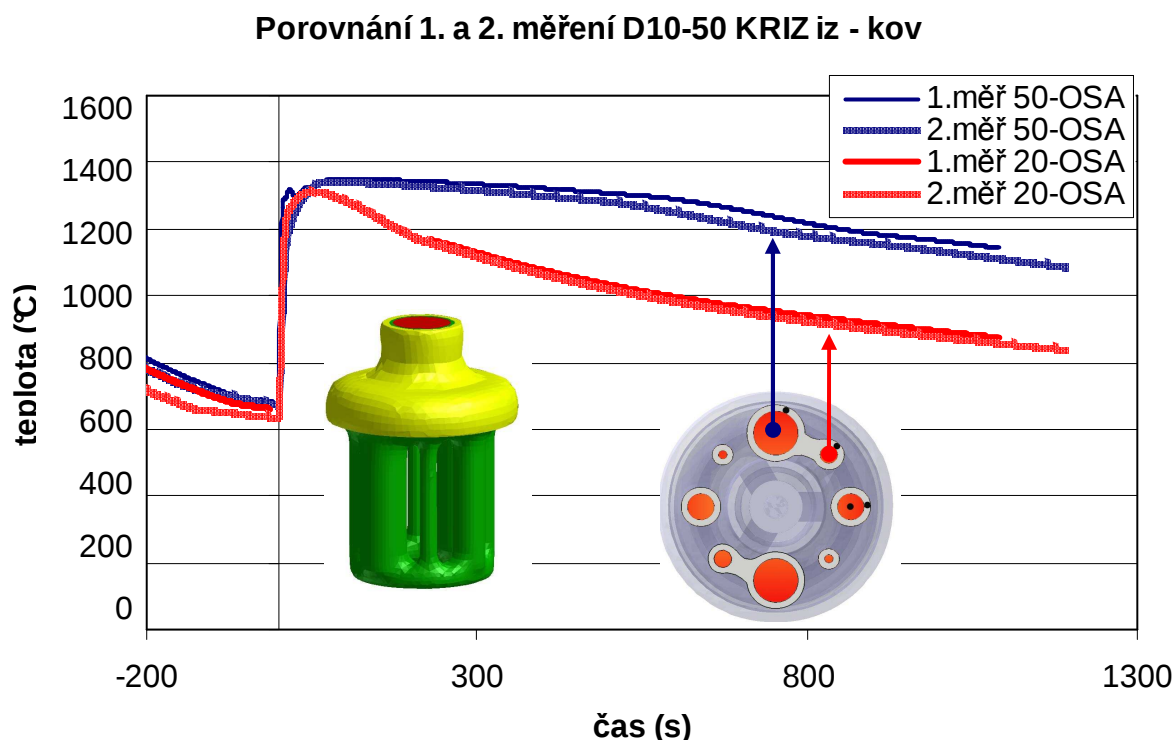
je izolována pouze v místě rozvodného kříže (rychlost chladnutí vyžíhané skořepiny $KRIZ_{iz}=1^{\circ}\text{C/s}$).

Při pomalejším ochlazování je teplota formy při lití celkově vyšší (teplota skořepiny v měřených místech při lití $CEL_{iz}=770-850^{\circ}\text{C}$; $KRIZ_{iz}=560-705^{\circ}\text{C}$). Instalace termočlánku do formy CEL_{iz} trvala o 30% déle než instalace do formy $KRIZ_{iz}$, pokud bychom teoreticky odlévali ve stejný okamžik (tj. 387s) jako $KRIZ_{iz}$, teplota skořepiny CEL_{iz} v měřených místech by byla ještě vyšší ($CEL_{iz_{teor.}}=790-895^{\circ}\text{C}$). Díky použití izolace po obvodu je i rozdíl v jednotlivých válcích při lití menší (rozdíl minima a maxima v měřených místech $CEL_{iz}=70^{\circ}\text{C}$, $KRIZ_{iz}=145^{\circ}\text{C}$).

Při použití izolace po obvodu je v okamžiku lití teplota formy vyšší a celkově homogennější.

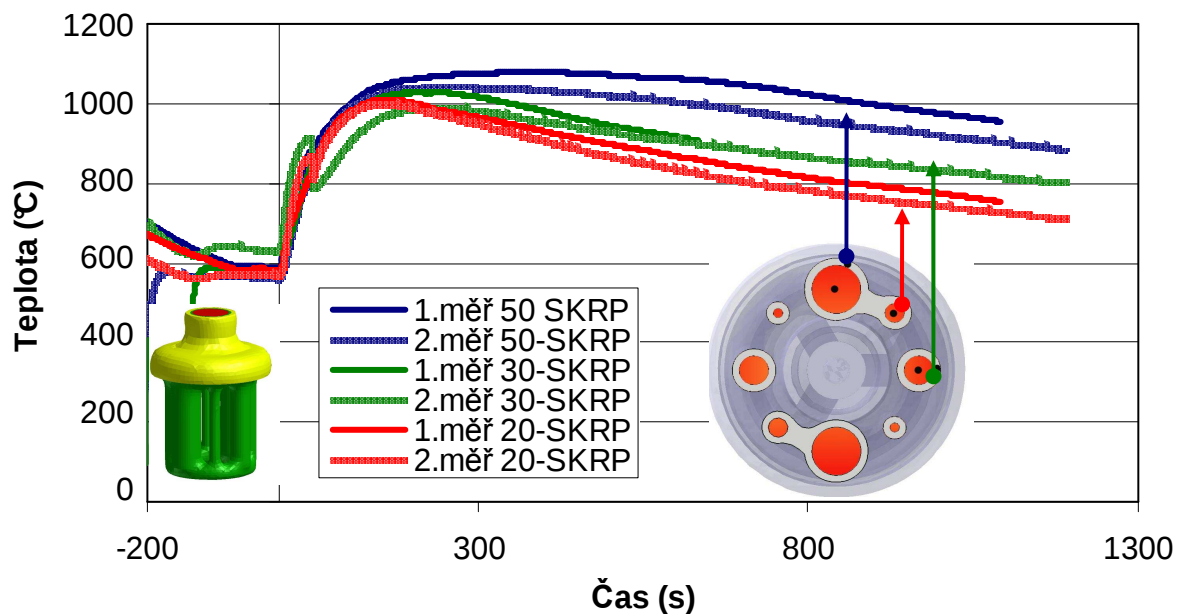
Porovnáním obou měření teplot formy D10-50 KRIZ iz (obr. 9.12, 9.13) byla shledána vysoká shoda hodnot teplot kovu i skořepiny. Počáteční teplota skořepiny před litím byla v obou případech také shodná.

Vzhledem k tomu, že experimentální výsledky měření mají vysokou shodu, jsou považovány jako relevantní a lze je použít pro verifikaci simulace.



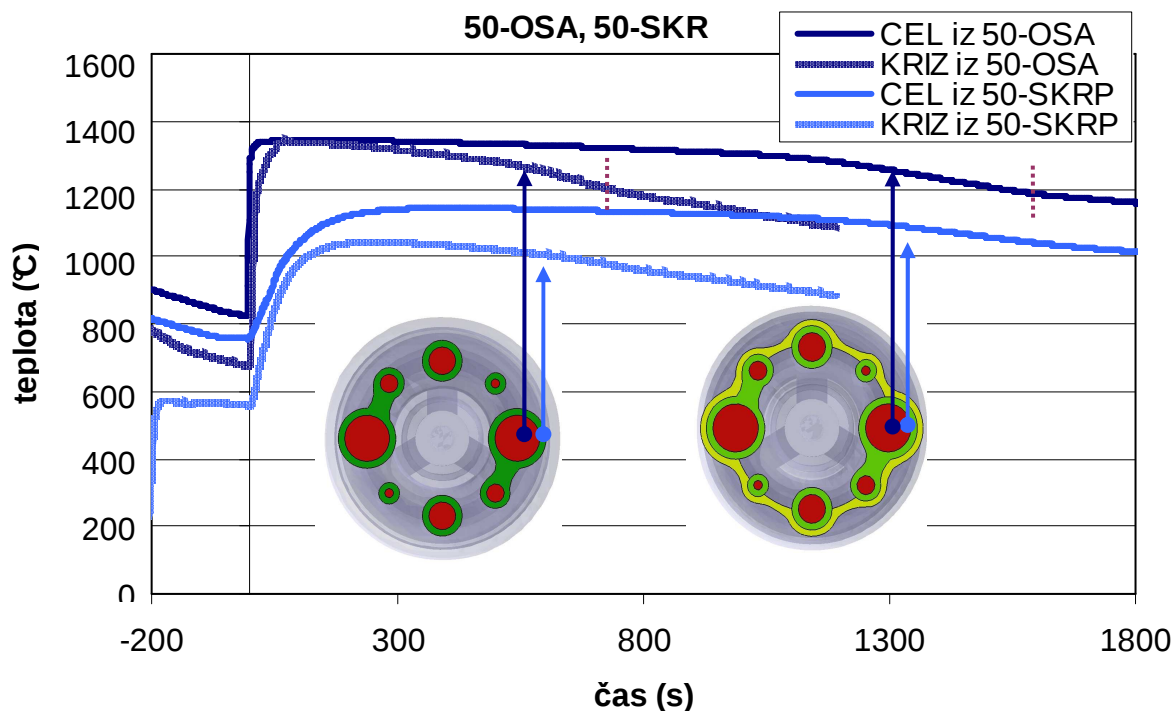
Obr. 9.12 Porovnání průběhu teplot kovu 1. a 2.měření formy D10-50 KRIZ iz

Porovnání 1. a 2. měření D10-50 KRIZ iz - skořepina

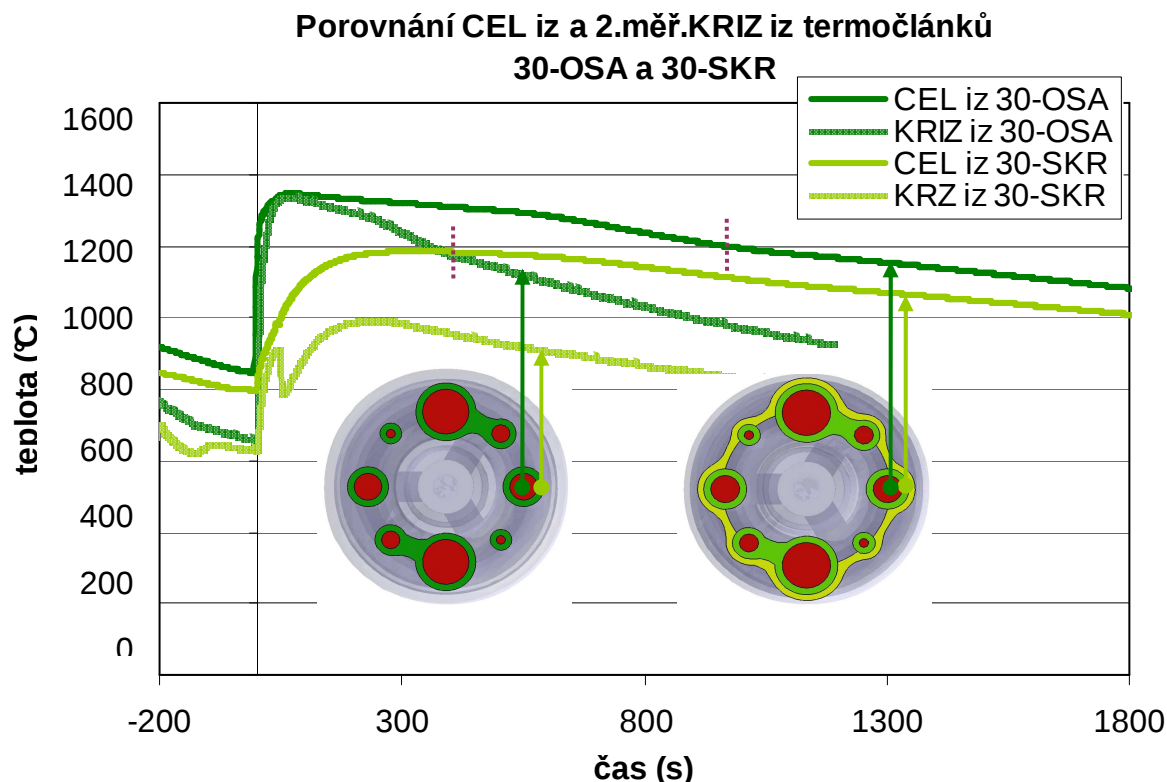


Obr. 9.13 Porovnání průběhu teplot skořepiny 1. a 2. měření formy D10-50 KRIZ

Porovnání CEL iz a 2.měř. KRIZ iz termočlánků 50-OSA, 50-SKR



Obr. 9.14 Porovnání průběhu teplot skořepiny a kovu válce Ø50 mm
forem D10-50 CEL iz a KRIZ iz (2.měření)



Obr. 9.15 Porovnání průběhu teplot skořepiny a kovu válce Ø30 mm
forem D10-50 CEL iz a KRIZ iz (2.měření)

9.4 Numerická simulace přenosu tepla ve formě D10-50

Experimentální měření bylo podkladem pro verifikaci výsledků numerické simulace a pro upřesnění okrajových podmínek výpočtu v programu ProCast2009 firmy ESI Group.

ProCast je profesionální slévárenský simulační systém, který vznikl pro potřeby amerického kosmického a leteckého průmyslu. V nezávislé studii vypracované organizací NASA byl vyhodnocen jako nejúspěšnější simulační programový systém pro oblast slévárenství.

ProCast je založen na metodě konečných prvků (FEM), modulární systém pracuje v 3D, uplatňuje CAD a definování uzlů na povrchu. Přenos tepla včetně výměny je na základě entalpie, umožňuje simulaci tepelných procesů vedením, prouděním i sáláním [7].

Pro vysokou shodu měření experimentálních forem D10-50 KRIZiz jsou naměřené teploty uvažovány jako relevantní a parametry numerické simulace jsou měněny tak, aby se co nejvíce přiblížily experimentálním hodnotám. Pro vyladění bylo toto měření vybráno z důvodu úplnosti všech hodnot průběhu teplot 2. měření D10-50 KRIZiz.

9.4.1 Geometrie a materiálové termofyzikální parametry simulace

3D model D10-50 KRIZ iz vytvořený v programu Solidworks byl exportován do modulu MeshCast programu ProCast, ve kterém byla vytvořena povrchová síť, na které se definují jednotlivé parametry v modulu PreCast.

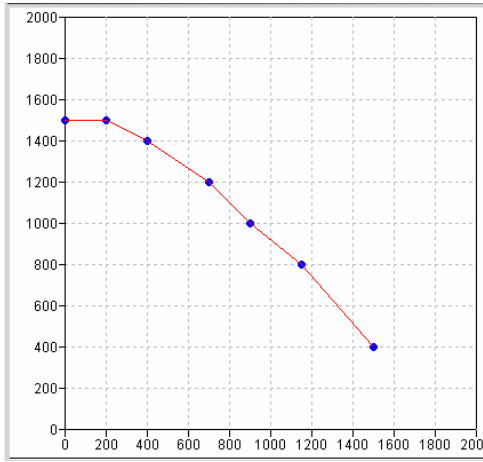
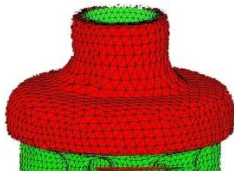
Pro výpočet se využilo materiálových parametrů uvedených v databázi programu ProCast - termofyzikální parametry skořepiny, vyrobené z molochitu a parametry izolace sibal. Termofyzikální vlastnosti odlévané slitiny INC 713LC v databázi nebyly, a proto byly vypočteny z chemického složení.

9.4.2 Počáteční a okrajové podmínky

Počáteční podmínky jako jsou teplota skořepiny, teplota kovu, teplota okolí, teplota izolace a pod. byly zadány podle skutečných naměřených hodnot.

Jako okrajové podmínky pro první výpočet byly využity výsledky ze simulací experimentálních skořepinových forem odlévaných na vzduchu v PBS z materiálu N155, uskutečněné v rámci projektu Tandem FT-TA3/072.

Tab.9.4. Optimalizované koeficienty přestupu tepla na rozhraní materiálů:

Rozhraní	Definice		
Skořepina - Kov		Čas [s]	Koeficient přestupu tepla [W/m²K]
		0	1500
		200	1500
		400	1400
		700	1200
		900	1000
		1150	800
		1500	400
Skořepina - Izolace		Koeficient přestupu tepla	
		100 W/m²/K	

Po výpočtu tuhnutí bylo v programu VisualCast5.0 firmy ESI Group provedeno vyhodnocení simulace - ve stejných místech umístění termočlánků při

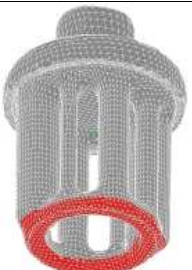
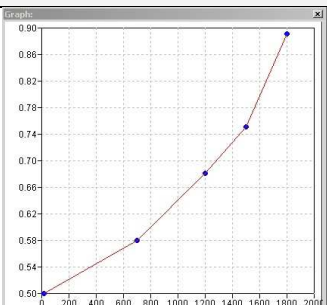
experimentálním měření byly vybrány body, ze kterých byl získán teplotní průběh, který byl graficky porovnán s naměřenými hodnotami.

Mezi naměřenými a simulovanými hodnotami byly zjištěny určité odchylky průběhu teplot kovu (obr. 9.16) a formy (obr. 9.18).

Zvýšení shody se řešilo změnou parametrů okrajových podmínek výpočtu dle teoretického tepelného rozboru při odlévání do skořepinových forem (KAP 3). Optimalizované parametry numerické simulace jsou uvedeny v tab. 9.4 a 9.5. Úpravy okrajových podmínek byly zaměřeny zejména na dosažení shody teplot kovu a doby tuhnutí, které jsou z hlediska krystalizace rozhodující, shoda teplot skořepiny je až sekundárním kritériem.

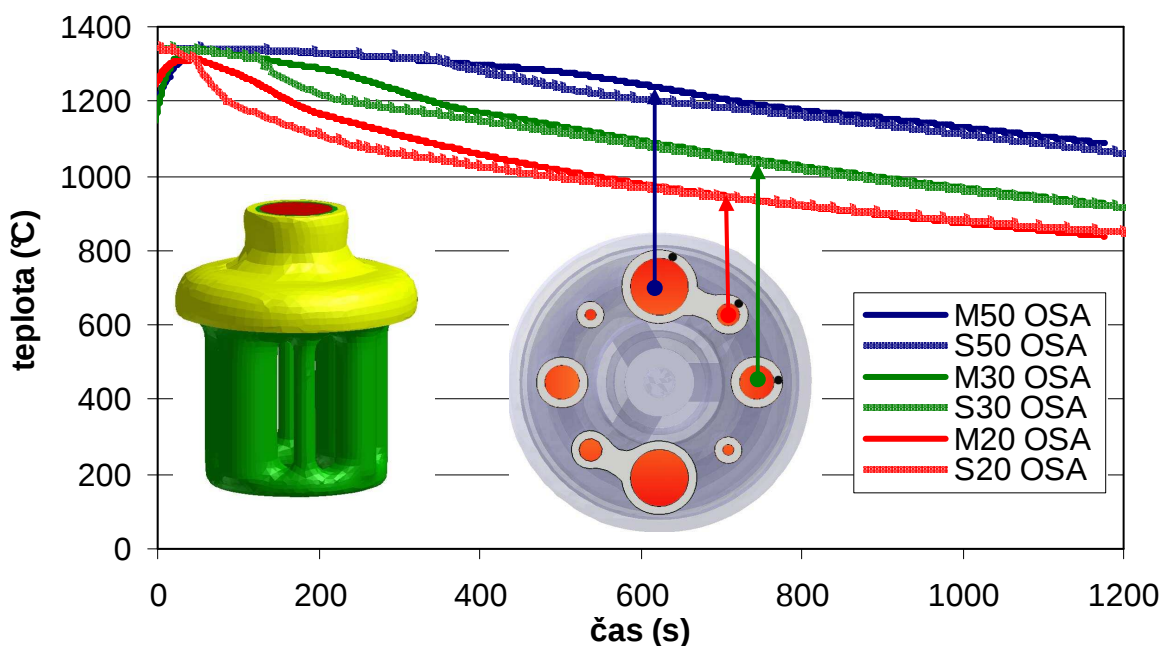
Na obr. 9.17 a 9.19 je znázorněno dosažení vysoké shody výsledků měření a simulace po optimalizaci hodnot okrajových podmínek.

Tab. 9.5. Optimalizované okrajové podmínky numerické simulace:

Podmínka	Plocha definice	Hodnota	
přestup tepla z povrchu izolace do okolního prostředí		Ve vakuované komoře	0 W/m ² K
		Bez vakuování	25 W/m ² K
		Emisivita	0.85
přestup tepla mezi podložím a skořepinou přes kontaktní plochy		Koeficient přestupu tepla	100 W/m ² /K
		Teplota okolí proměnlivě narůstá v čase	
přestup tepla mezi skořepinou a okolním prostředím		Ve vakuované komoře	0 W/m ² K
		Bez vakuování	10 W/m ² K
		Teplota okolí	50 °C
			°C
			Emisivita
			20
			700
			1200
			1500
			1800

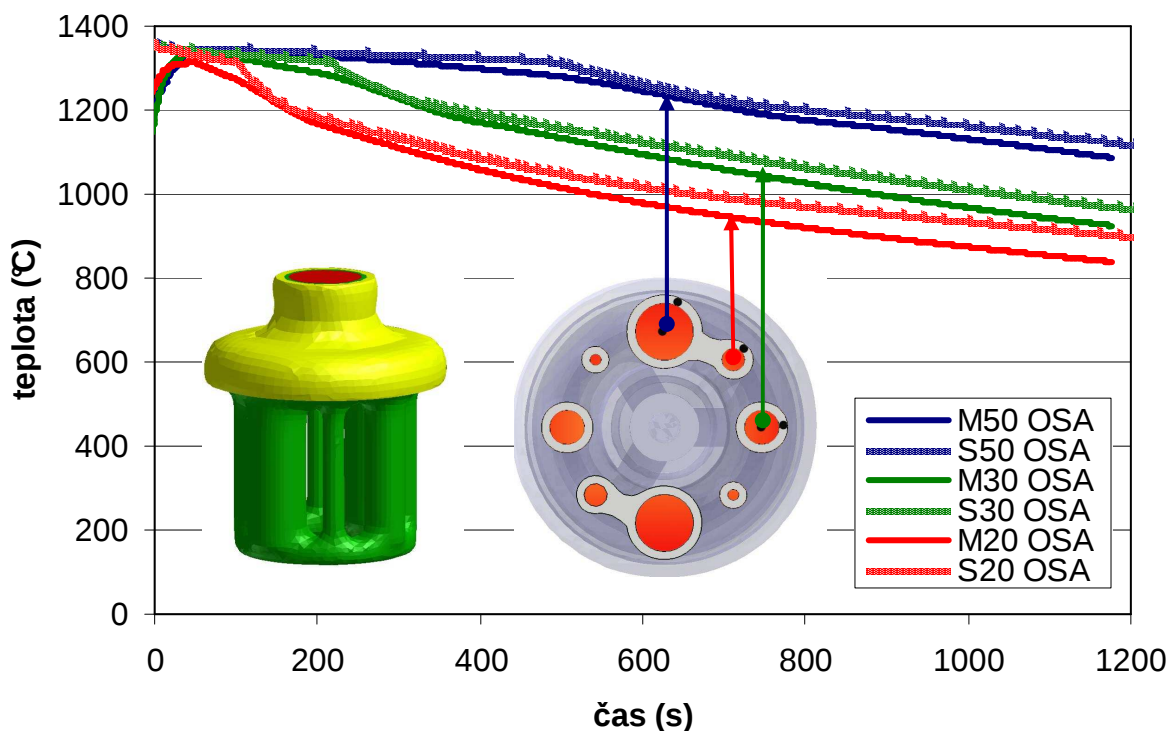
9.4.3 Výsledky simulace teplotního průběhu D10-50 KRIZ iz

Porovnání simulace před úpravou dat s 2.měř D10-50 KRIZ iz - kov



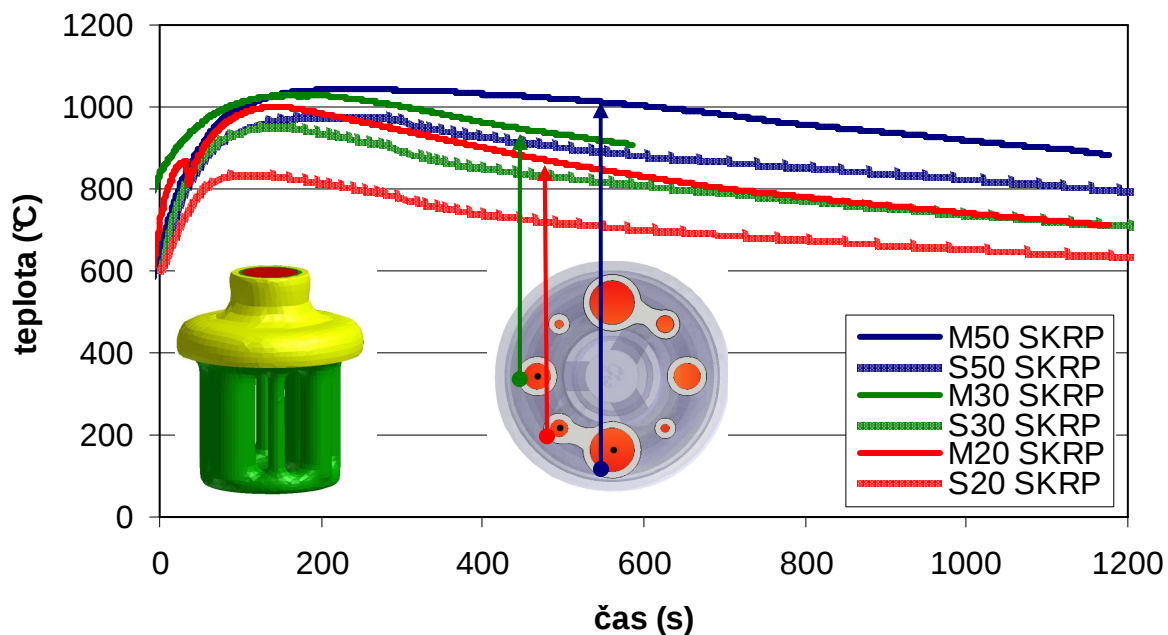
Obr. 9.16 Porovnání průběhu teplot kovu simulace (S) před úpravou okrajových podmínek s 2. experimentálním měřením (M) formy D10-50 KRIZ iz

Porovnání simulace po úpravě dat s 2.měř D10-50 KRIZ iz - kov



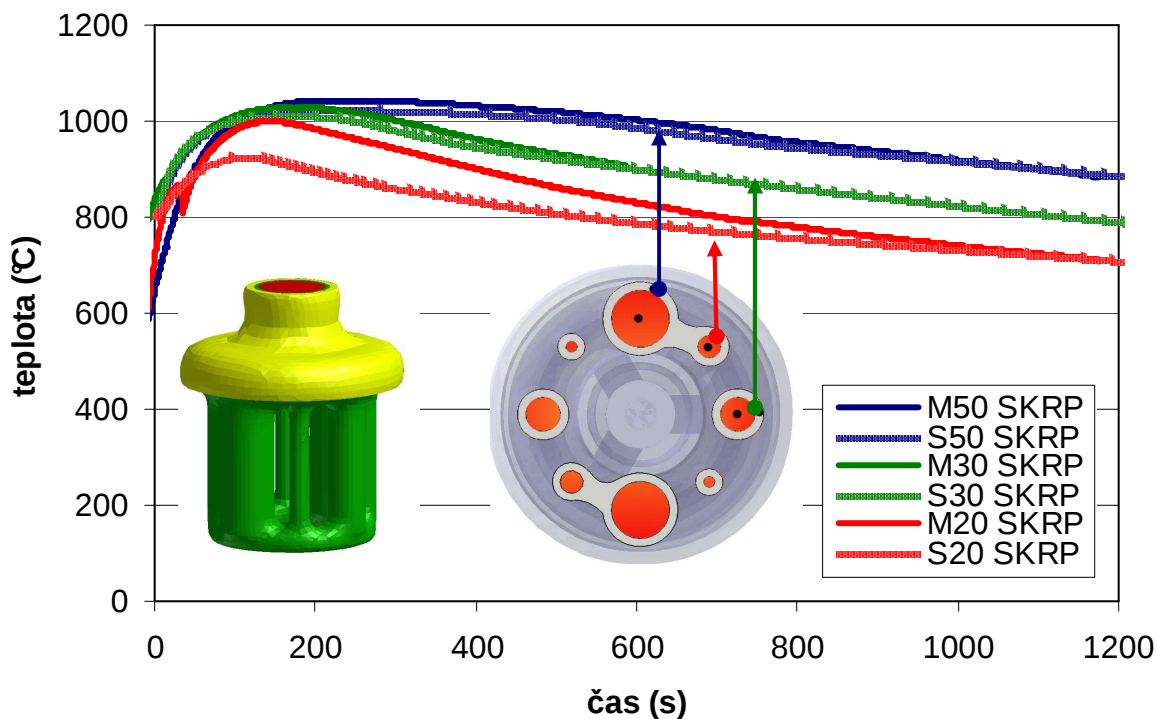
Obr. 9.17 Porovnání průběhu teplot kovu simulace (S) po úpravě okrajových podmínek s 2. experimentálním měřením (M) formy D10-50 KRIZ iz

Porovnání simulace před úpravou dat s 2.měř D10-50 KRIZ iz - SKRP



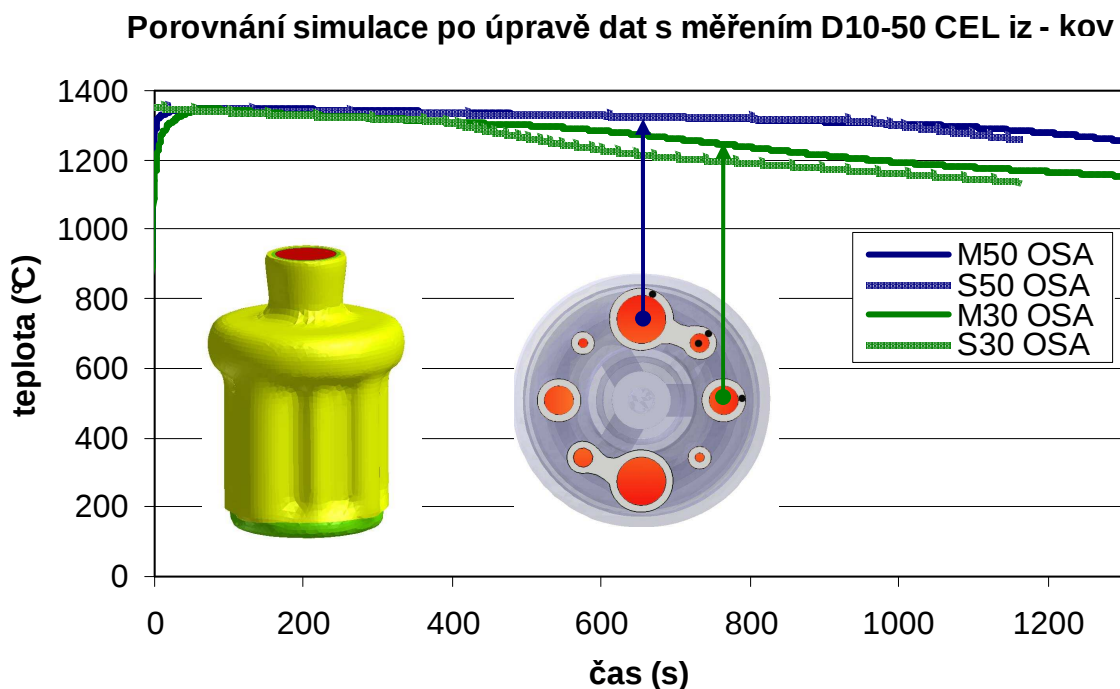
Obr. 9.18 Porovnání průběhu teplot skořepiny simulace (S) před úpravou okrajových podmínek s 2. experimentálním měřením (M) formy D10-50 KRIZ iz

Porovnání simulace po úpravě dat s 2.měř D10-50 KRIZ iz - SKRP

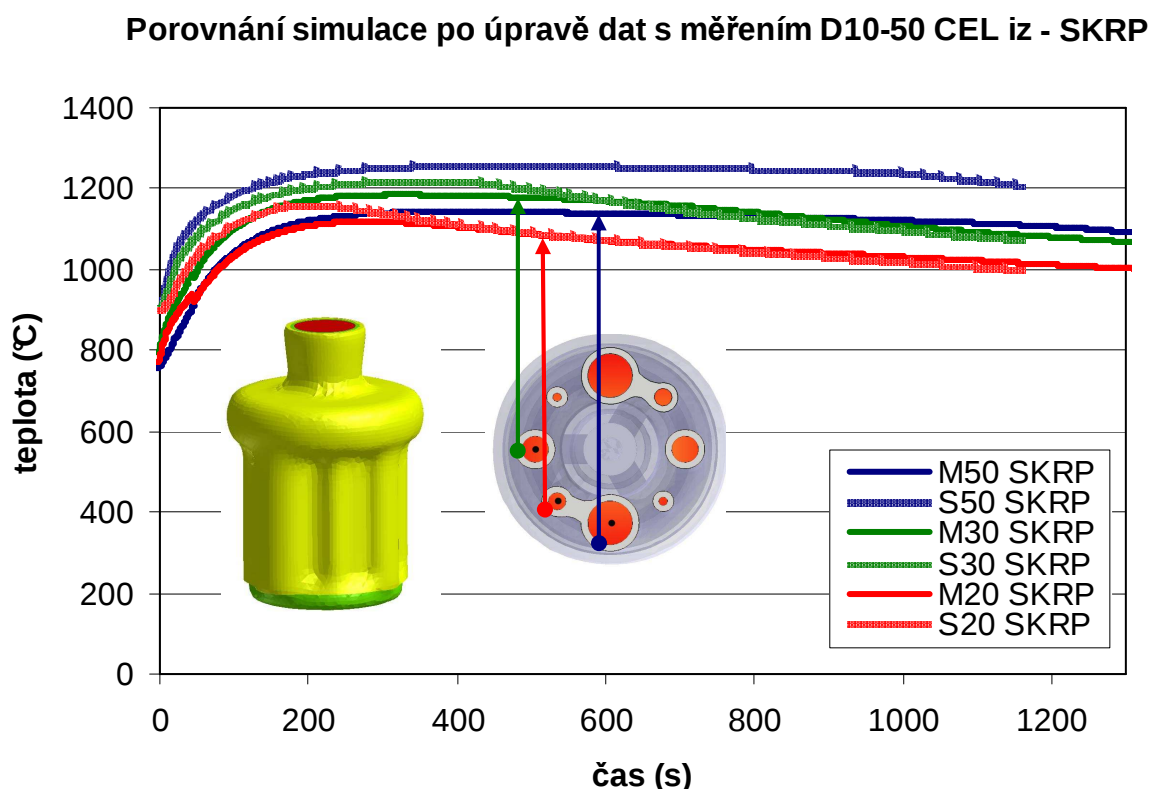


Obr. 9.19 Porovnání průběhu teplot skořepiny simulace (S) po úpravě okrajových podmínek s 2. experimentálním měřením (M) formy D10-50 KRIZ iz

9.4.4 Simulace průběhu teplot formy D10-50 CEL iz



Obr. 9.20 Porovnání průběhu teplot kovu simulace (S) po úpravě okrajových podmínek měřením (M) formy D10-50 CEL iz



Obr. 9.21 Porovnání průběhu teplot skořepiny simulace (S) po úpravě okrajových podmínek s měřením (M) formy D10-50 CEL iz

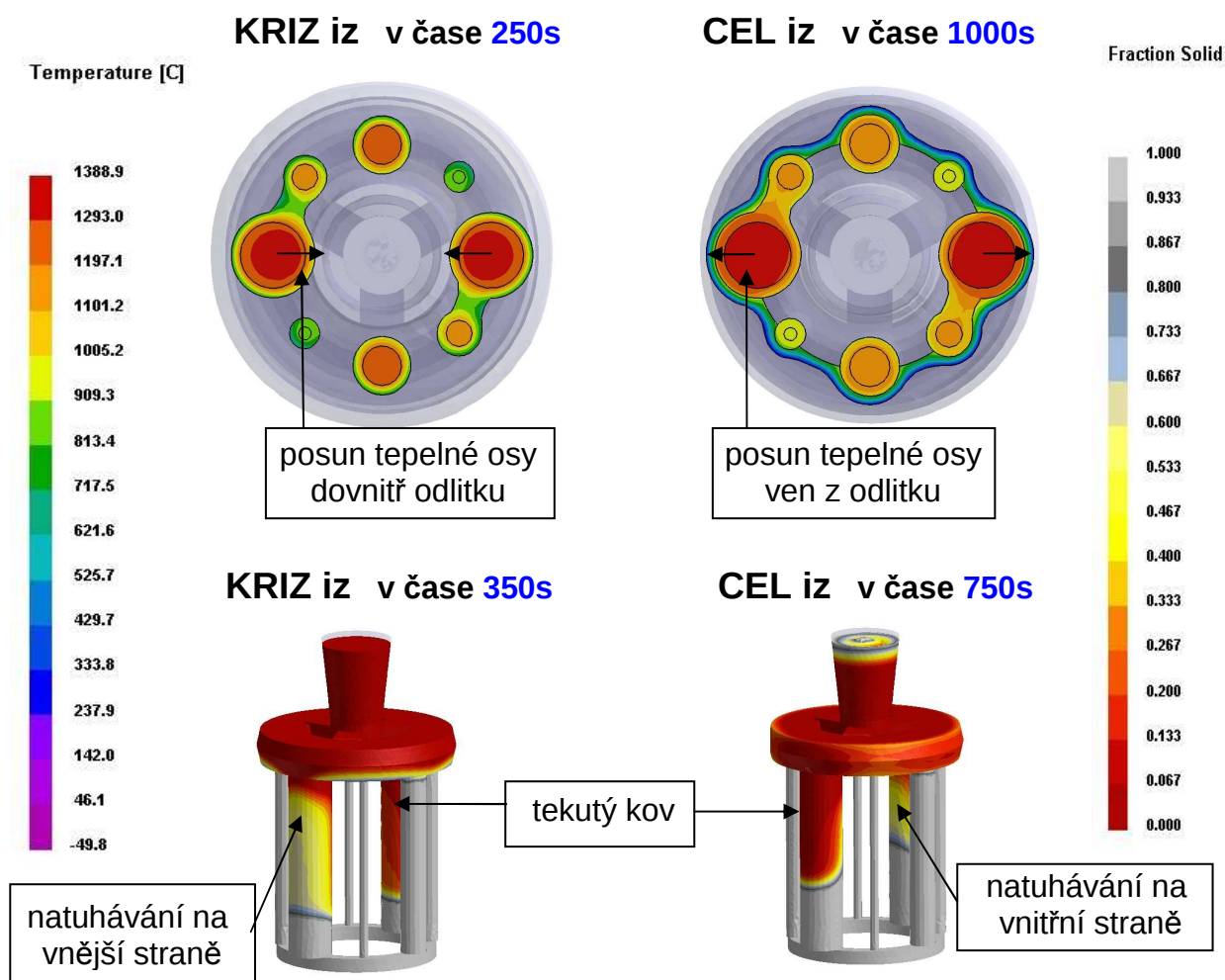
Optimalizované okrajové podmínky přestupu tepla byly bez úprav použity pro simulaci tuhnutí odlitku ve formě D10-50 CEL iz. Porovnáním naměřených a

simulovaných průběhů teplot v kovu (obr. 9.20) a formě (9.21) bylo dosaženo vysoké shody, přestože okrajové podmínky pro tuto formu nebyly laděny.

Naměřené a simulované teploty ve skořepině válce Ø50 mm vykazují velkou odchylku, tato odchylka je zřejmě způsobena chybou v měření, kdy termočlánek pravděpodobně nebyl umístěn v předpokládaném místě, neboť téměř po celou dobu měření vykazoval hodnoty nižší než termočlánek umístěný ve skořepině válce Ø30 mm, přičemž teplota kovu ve válci Ø50 mm byla vyšší než teplota kovu válce Ø30 mm.

9.4.5 Simulace tuhnutí odlitků forem D10-50 KRIZiz a CELiz

Na základě optimalizovaných hodnot okrajových podmínek byl proveden výpočet teplotního pole odlitků při tuhnutí.



Obr. 9.22 Posun tepelné osy odlitku při simulaci tuhnutí v různě izolovaných skořepinách D10-50

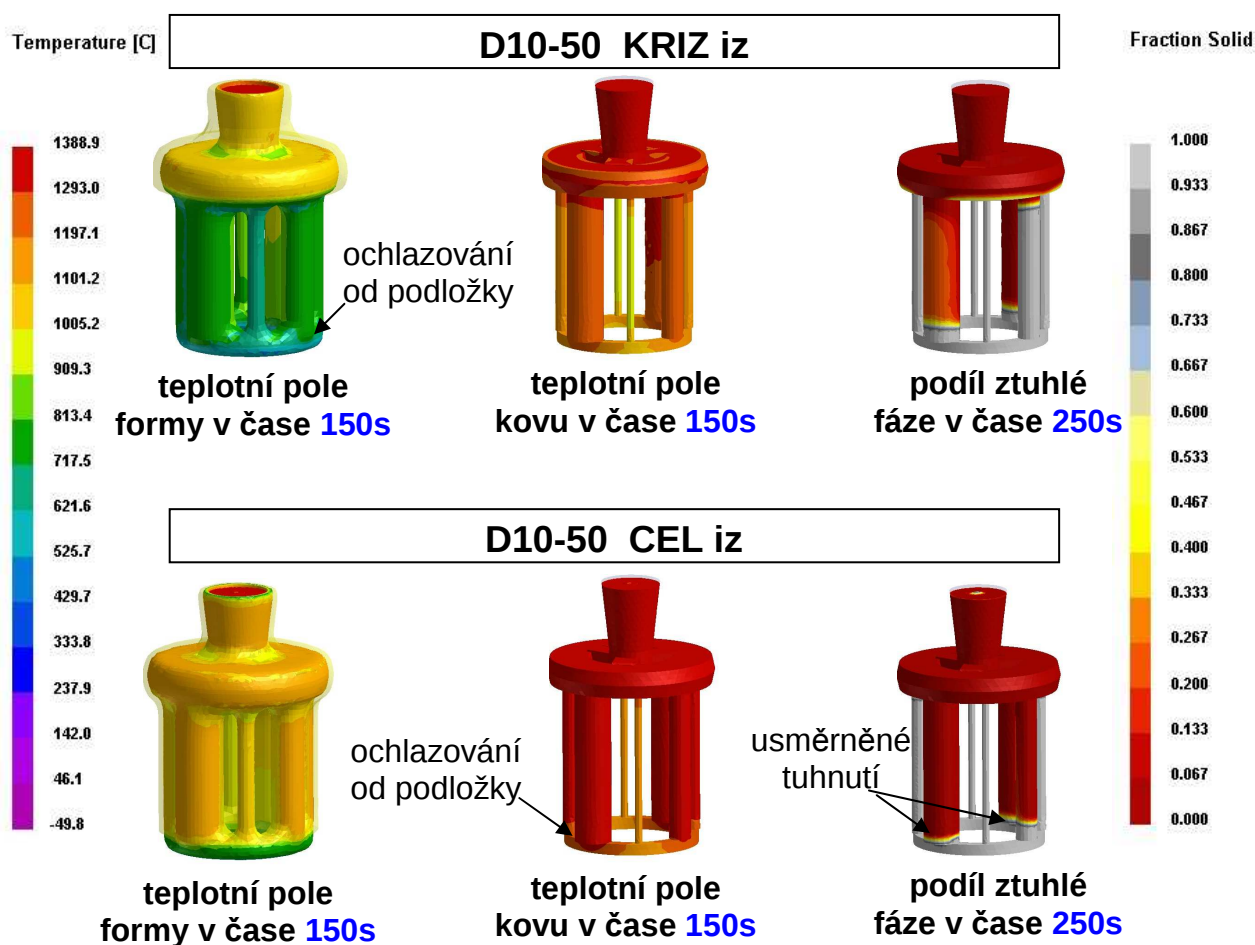
Při výpočtech byl prokázán posun tepelné osy válců odlitku mimo osu geometrickou vlivem různé intenzity ochlazování skořepiny na vnější a vnitřní straně, který se předpokládal z teoretického rozboru přestupu tepla. U odlitku z formy KRIZ iz směrem k ose skořepiny, u CEL iz pak směrem od osy skořepiny (obr.9.22 - řezy byly vybrány ve stejné výšce skořepiny tj. v rovině umístění termočlánků při měření).

Posun tepelné osy válců směrem k ose skořepiny KRIZ iz byl způsoben vlivem vzájemného osálávání válců skořepiny uvnitř, které si tepelnou energii navzájem předávaly a jen část byla vyzářena do okolí mezerami mezi válci, vnější části skořepiny směřující do volného prostoru teplo pouze vyzářily do okolí.

Posun osy u izolované formy CEL iz není tak výrazný jako u KRIZ iz a je patrný pouze u válce průměru 50 mm.

Porovnání teplotního pole skořepiny a kovu různě izolovaných skořepin ze simulace tuhnutí je znázorněno na obr.9.23.

Jak bylo prokázáno experimentálním měřením, izolací formy se významně zpomaluje odvod tepla a doba tuhnutí se prodlužuje.



Obr. 9.23 Porovnání teplotního pole formy, kovu, podílů ztuhlé fáze a staženin ve stejném čase KRIZ iz a CEL iz ze simulace tuhnutí

9.5 Makrostruktura odlitků D10-50

Měřením a numerickou simulací teplotních poměrů při tuhnutí a chladnutí experimentálních odlitků D10-50 ve formách s izolací KRIZ iz a CEL iz byly zjištěny značné rozdíly v rychlosti tuhnutí odlitků:

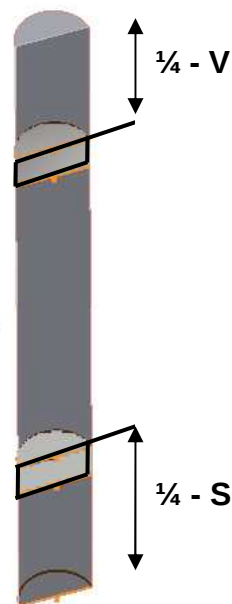
- různých průměrů (Ø50, Ø30, Ø20, Ø10 mm)
- s různým způsobem tepelné izolace skořepiny (KRIZ iz, CEL iz)
- různě směrově orientovaných v sestavě stromečku (strana odlitků vně a do osy stromečku)

Očekávalo se, že rozdílné průběhy ochlazování mají vliv na kinetiku krystalizace, které se projeví na rozdílné struktuře a mechanických vlastnostech.

Výroba vzorků pro hodnocení makrostruktury a tvrdosti:

- odstranění skořepiny z odlitků (obr.9.25)
- válce v ose vertikálně rozříznuty (mimo průměr Ø10 mm, který byl vlivem tahového a tlakového napětí při chladnutí zdeformován)
- v jedné čtvrtině od spodu a jedné čtvrtině od vrchu byly z půlek válců vyříznuty vzorky (obr. 9.24)
- broušení

Systém značení vzorků je uveden v tab.9.6.



Obr. 9.24 Místa odběru vzorků

Tab. 9.6.: Systém značení vzorků z odlitků D10-50:

Označení vzorku	Způsob izolace formy	Průměr válce [mm]	Místo odběru vzorku
43V	KRIZ iz 	Ø 50	vršek
43S		Ø 50	spodek
42V		Ø 30	vršek
42S		Ø 30	spodek
41V		Ø 20	vršek
41S		Ø 20	spodek
48V		Ø 10	vršek
48S		Ø 10	spodek
33V	CEL iz 	Ø 50	vršek
33S		Ø 50	spodek
32V		Ø 30	vršek
32S		Ø 30	spodek
31V		Ø 20	vršek
31S		Ø 20	spodek
38V		Ø 10	vršek
38S		Ø 10	spodek

Všechny makrovýbrusy byly leptány roztokem $H_2O + HCl$ (35%) + H_2O_2 (30%) v poměru koncentrací jednotlivých složek 1 : 2 : 0,2 po dobu 30 minut. Výbrusy a naleptání bylo provedeno v laboratořích PBS.

Po naleptání byla vyhodnocena makrostruktura, jejímž cílem bylo stanovit maximální a střední velikost zrna a počet zrn. Počet zrn byl hodnocen na roztečných kružnicích. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 9.7 a struktury v tab. 9.11 a 9.12.

Tab. 9.7.: Hodnocení struktury příčných vzorků z odlitků D10-50:

Označení vzorku	Průměr kružnice D [mm]	Počet zrn n	Střední velikost zrna [mm]	Max. velikost zrna [mm]	Popis struktury
43V	Ø 46	47	4	8	po obvodu kolumnární zrna do hl. 10mm, střed rovnoosá zrna Ø4,5mm
43S	Ø 46	50	3,5	10	po obvodu kolumnární zrna do hl. 15mm, střed rovnoosá zrna Ø4mm
42V	Ø 26	32	5	8	kolumnární zrna téměř do středu-hl.11mm, střed rovnoosá zrna
42S	Ø 26	49	3	5	úzká kolumnární zrna do hl. 8 mm ve středu rovnoosá zrna Ø 4 mm
41V	Ø 18	29	2,5	3	jemná kolumnární zrna téměř až do středu
41S	Ø 18	60	1,5	3	kolumnární zrna až do středu
48V	Ø 9	20	2	4	zcela kolumnární zrna
48S	Ø 9	25	1,5	2	zcela kolumnární zrna
33V	Ø 46	45	5	8	po obvodu kolumnární do hl. 5mm, ve středu rovnoosá zrna Ø 7 mm
33S	Ø 46	44	3	8	po obvodu kolumnární zrna do hl. 5 mm, střed rovnoosá zrna Ø 5 mm
32V	Ø 26	31	3	7	kolumnární zrna do hl. 10 mm, ve středu rovnoosá zrna Ø3,5mm
32S	Ø 26	53	2,5	5,5	kolumnární zrna do hl. 8 mm, ve středu rovnoosá zrna Ø 3 mm
31V	Ø 18	18	2,5	6	zcela kolumnární
31S	Ø 18	57	2,5	3	zcela kolumnární
38V	Ø 9	20	1,5	2,5	zcela kolumnární
38S	Ø 9	27	1,5	2,5	zcela kolumnární

Tab. 9.8.: Porovnání počtu zrn na válcích různých průměrů a izolací:

Způsob izolace	Počet zrn n válců na roztečné kružnice D			
	D50 na Ø46	D30 na Ø26	D20 na Ø18	D10 na Ø9
D10-50 KRIZ iz (V/S)	47/50	32/49	29/60	20/25
D10-50 CEL iz (V/S)	45/44	31/53	18/57	20/27

Tab. 9.9.: Porovnání střední velikosti zrn na válcích různých průměrů a způsobu izolace:

Způsob izolace	Střední velikost zrna válců [mm]			
	D50	D30	D20	D10
D10-50 KRIZ iz (V/S)	4/3,5	5/3	2,5/1,5	2/1,5
D10-50 CEL iz (V/S)	5/3	3/2,5	2,5/2,5	1,5/1,5

Tab. 9.10.: Porovnání maximální velikosti zrn na válcích různých průměrů a způsobu izolace:

Způsob izolace	Maximální velikost zrna válců [mm]			
	D50	D30	D20	D10
D10-50 KRIZ iz (V/S)	8/10	8/5	3/3	4/2
D10-50 CEL iz (V/S)	8/8	7/5,5	6/3	2,5/2,5



Obr. 9.25 Experimentální odlitky po odstranění skořepiny

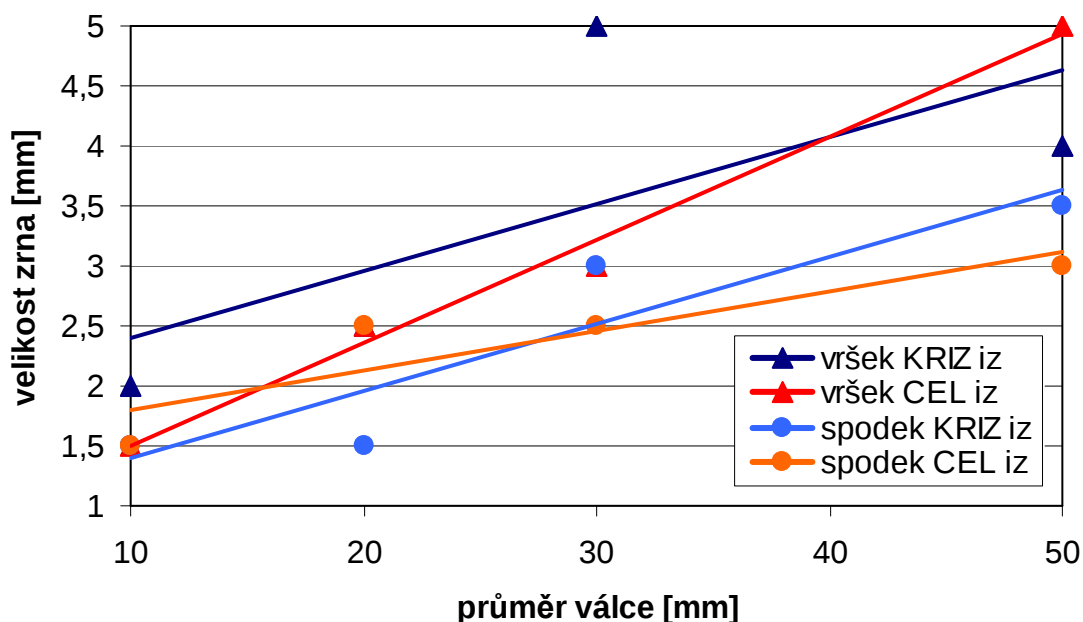
Z tab 9.7, 9.8, 9.9, 9.10 a obr. 9.26 je zřejmé, že zvětšování průměru válců vede k výraznému hrubnutí zrna a snižování jejich počtu.

Ve sledovaných částech válců jsou zrna v horních částech hrubší a jejich počet je menší než v dolních částech, kde jsou zrna jemnější a početnější.

Mezi odlitky válců s různým způsobem izolace není vliv izolace na počet a střední hodnotu zrna prokazatelný. Maximální velikost zrna je při použití izolace kolem obvodu stromečku CEL iz vyšší a obvodová oblast kolumnárních zrn zasahuje do menší hloubky od obvodu.

Z důvodu půlkruhového tvaru příčných vzorků je nemožné přesně zjistit posunutí tepelné osy. Na podélných řezech výraznější posunutí patrné není.

Závislost střední velikosti zrna na průměru válce a způsobu izolace



Obr. 9.26 Závislost střední velikosti zrna na průměru válce a způsobu izolace

9.6 Numerická simulace makrostruktury odlitků D10-50 KRIZ iz

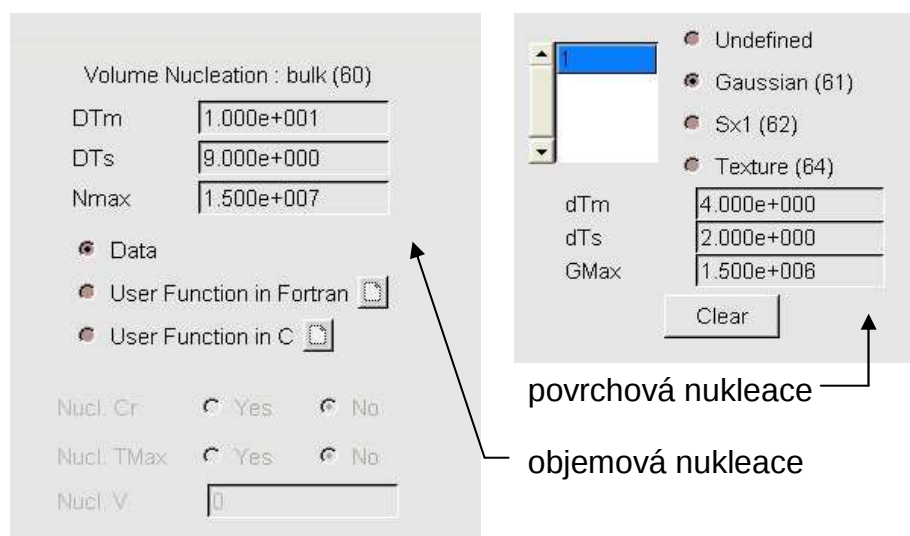
Po optimalizaci výpočtových parametrů simulace tuhnutí pomocí modulu CAFE (Cellular Automatic Finite Elements Methods), který je součástí systému ProCast, byly pro slitinu INC 713LC provedeny simulace struktury na experimentálních odlitcích D10-50 KRIZ iz.

Výpočet průběhu tuhnutí pomocí numerické simulace v programu ProCast byl využit pro vstupní data do výpočtu krystalizace v modulu CAFE.

Obr. 9.27 Vypočtená fyzikální data pro INC 713LC

Fyzikální data (obr. 9.27) pro výpočet kinetiky růstu pro použitou slitinu INC 713LC v databázi CAFE nebyly. Bylo je nutno doplnit pomocí výpočtu parametrů a_2 a a_3 , které popisují kinetiku růstu dendritů z chemického složení a frakce solidu slitiny. Výpočet byl uskutečněn v modulu CalcoSOFT3D, který je součástí softwaru. Objemová a povrchová nukleace pro první výpočet byla zadána z databáze programu ProCast.

Vyhodnocené simulované struktury byly vybrány ze stejných míst, jako byly vyřezány vzorky z experimentálních skořepin. Porovnání reálných struktur KRIZ iz a struktur simulovaných před optimalizací dat je v tab. 9.11.



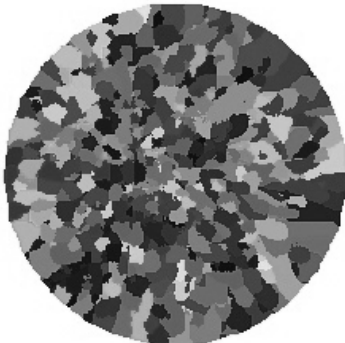
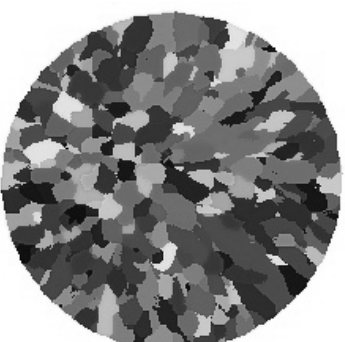
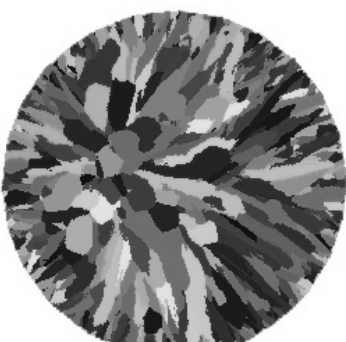
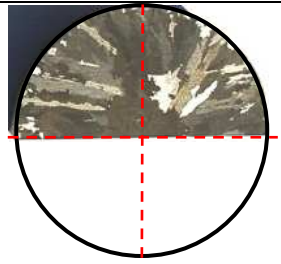
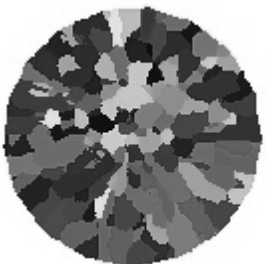
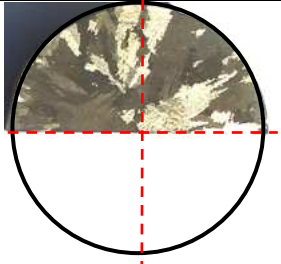
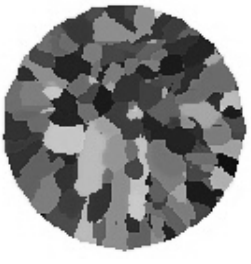
Obr. 9.28 Parametry objemové a povrchové nukleace po optimalizaci

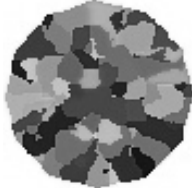
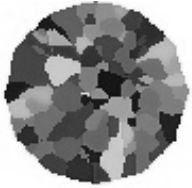
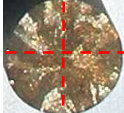
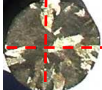
Po porovnání obou struktur bylo konstatováno, že doporučené hodnoty v programu nezajišťují dostatečnou shodu. Optimalizací parametrů objemové a povrchové nukleace byly nalezeny hodnoty (obr. 9.28), u nichž lze shodu u většiny reálných a simulovaných struktur považovat za dobrou (tab. 9.11).

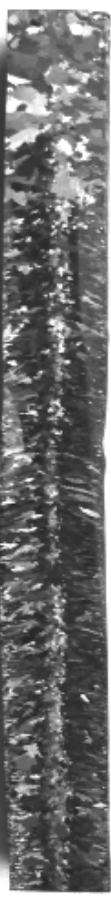
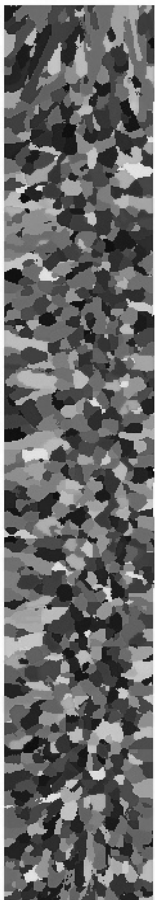
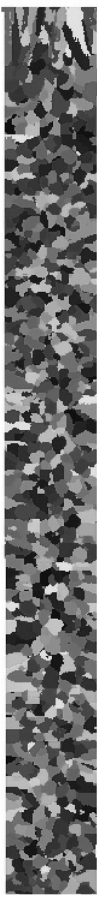
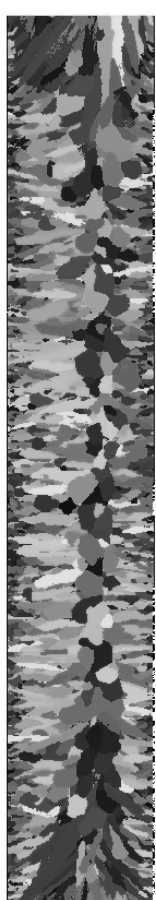
Na simulovaných strukturách je vidět výrazné posunutí tepelné osy mimo osu geometrickou v důsledku intenzivnějšího ochlazování na vnějším obvodu skořepiny a tím nesymetrického tuhnutí odlitků válců. Tento efekt se projevuje zejména u masivnějších odlitků, nejvýznamnější u válce D50, méně u válců D30 a D20, u válce D10 je posun neznatelný. Porovnání posunu os u reálných a simulovaných struktur není možno pro půlkruhové tvary vzorků porovnat.

U simulovaných podélných řezů je ve spodní části válce D50 patrný růst kolumnárních zrn ve směru výrazného odvodu tepla do podložky, na reálných řezech tyto kolumnární zrna nejsou, naopak jsou zde poměrně jemná rovnoosá zrna, které zřejmě vznikly ze zárodků na stěnách během lití, ale do spodní části byly přeneseny prouděním během lití. Tyto pochody je velice obtížné v simulaci nadefinovat neboť jsou už na hranici možností simulačních programů.

Tab. 9.11.: Porovnání skutečné a simulované struktury KRIZ iz :

Skutečné struktury	Simulované struktury před optimalizací	Simulované struktury po optimalizaci
 43S		
 43V		
 42S		
 42V		

Skutečné struktury	Simulované struktury před optimalizací	Simulované struktury po optimalizaci
 41S		
 41V		
 48S		
 48V		
		
D50		

Skutečné struktury		Simulované struktury před optimalizací		Simulované struktury po optimalizaci	
					
D30	D20	D30	D20	D30	D20

9.6.1 Numerická simulace makrostruktury odlitků D10-50 CEL iz

Optimalizované parametry pro simulaci makrostruktury experimentálních odlitků D10-50 KRIZ iz byly použity i pro simulaci makrostruktury D10-50 CEL iz.

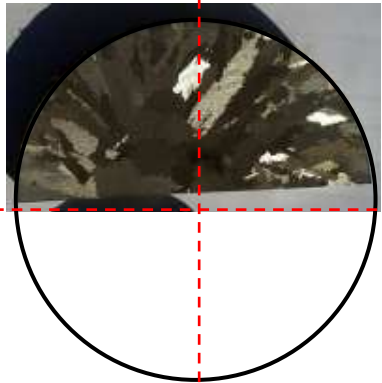
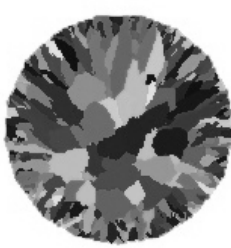
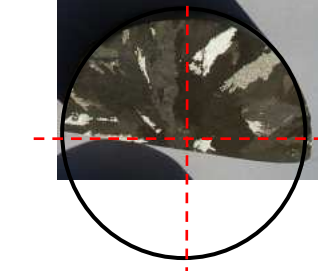
Porovnáním reálných a simulovaných struktur (tab. 9.12) bylo u většiny dosaženo dobré shody, přestože parametry simulace nebyly pro odlitek CEL iz laděny.

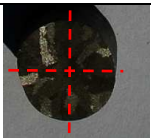
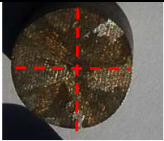
9.7 Zkoušení mechanických vlastností odlitků D10-50

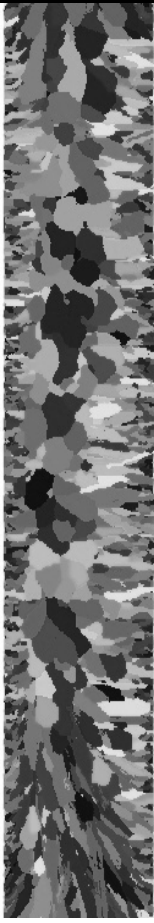
Jak bylo řečeno v úvodu kap.9.5, z důvodu rozdílných průběhů ochlazování mající vliv na strukturu, byl očekáván i vliv na mechanické vlastnosti.

Pro posouzení mechanických vlastností byly použity zkoušky tvrdosti a pevnosti v tahu.

Tab. 9.12.: Porovnání skutečné a simulované struktury CEL iz:

Skutečné struktury	Simulované struktury
 33S	
 33V	
 32S	
 32V	

Skutečné struktury	Simulované struktury
 31S	
 31V	
 38S	
 38V	
	
D50	

Skutečné struktury		Simulované struktury	
			
D30	D20	D30	D20

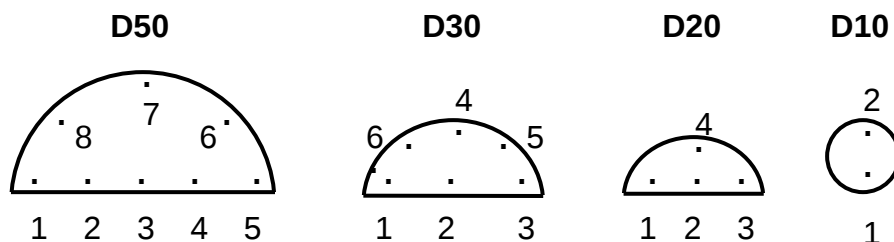
9.7.1 Zkoušky tvrdosti odlitků D10-50

Pro posouzení tvrdosti byla použita hodnota tvrdosti HV10, měřená na příčných obroušených půlkruhových vzorcích, které sloužily pro hodnocení struktury. Značení vzorků je uvedeno v tab.9.6.

Počet měření byl proveden podle velikosti vzorku a je znázorněn na obr. 9.29.

Výsledky měření tvrdosti jsou uvedeny v tab.9.13.

Hodnoty tvrdosti vzorků mají poměrně velký rozptyl a významnější závislost se nepodařilo zjistit. Většina vzorků KRIZ iz vykazuje průměrné hodnoty tvrdosti vyšší než v CEL iz (přibližně o 10HV).



Obr. 9.29 Místa a počet měření tvrdosti vzorků D10-50

Tab. 9.13.: Hodnoty tvrdosti HV10 měřených vzorků D10-50:

Označení vzorku	Hodnoty tvrdosti HV10 v měřených místech D10-50								
	1	2	3	4	5	6	7	8	průměr
43V	340	334	351	340	320	342	332	334	336
43S	353	345	350	353	345	350	338	348	347
42V	373	361	353	358	352	364	x	x	360
42S	328	315	333	339	323	342	x	x	330
41V	360	330	327	328	x	x	x	x	336
41S	370	349	364	345	x	x	x	x	357
48V	376	383	x	x	x	x	x	x	379
48S	365	381	x	x	x	x	x	x	373
33V	322	301	292	306	332	325	322	316	314
33S	350	376	338	330	351	310	320	363	342
32V	342	359	367	349	359	367	x	x	357
32S	322	308	328	312	326	306	x	x	317
31V	364	325	355	340	x	x	x	x	346
31S	361	324	364	332	x	x	x	x	345
38V	354	367	x	x	x	x	x	x	360
38S	372	369	x	x	x	x	x	x	370

9.7.2 Zkoušky pevnosti v tahu odlitků D10-50

Zkoušky pevnosti v tahu byly provedeny na zkušebních tělesech ($\varnothing 5\text{mm}$, $L_0=25\text{mm}$), vyrobených soustružením ze zbylých válců D10-50 při teplotě 20°C. Z každého válce byly vyrobeny dvě zkušební tělesa, vždy ze spodní a vrchní části, systém značení vzorků je stejný jako v předchozích případech a je uveden v tab.9.6. Tahová zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN 10002-1.

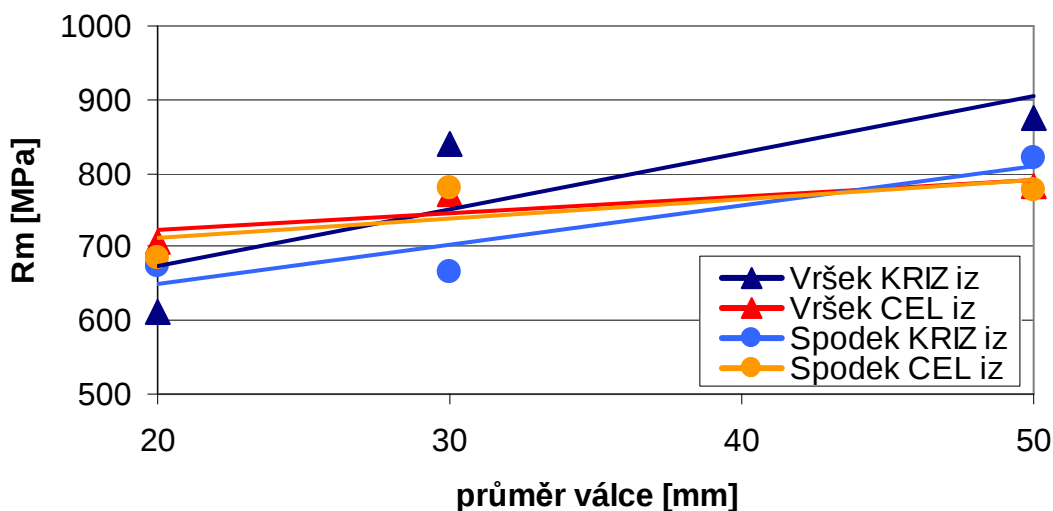
Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v tab.9.14.

Tab. 9.14.: Výsledky tahových zkoušek D10-50:

Označení vzorku	Průměr válce [mm]	Pevnosti v tahu D10-50		
		R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
43V	Ø 50	727	875	9,8
43S	Ø 50	727	822	5,8
42V	Ø 30	746	841	6
42S	Ø 30	662	665	0,4
41V	Ø 20	x	612	0,2
41S	Ø 20	x	675	0,3
33V	Ø 50	697	782	6,2
33S	Ø 50	724	778	5
32V	Ø 30	706	771	5,9
32S	Ø 30	735	781	1,1
31V	Ø 20	694	706	1,4
31S	Ø 20	x	685	0,3

Na odlitcích válců Ø20 mm nebylo možno stanovit mez kluzu R_{p0,2}, protože ihned po dosažení předpokládané hodnoty meze kluzu došlo k lomu. Výsledek zkoušky byl ovlivněn nepřipustnou licí vadou (ředina) a tedy i hodnoty pevnosti a tažnosti nelze považovat za příliš věrohodné. Výskyt ředin byl pravděpodobně způsoben v důsledku nedostatečného usměrněného tuhnutí.

**Závislost meze pevnosti na průměru válce
a způsobu izolace**

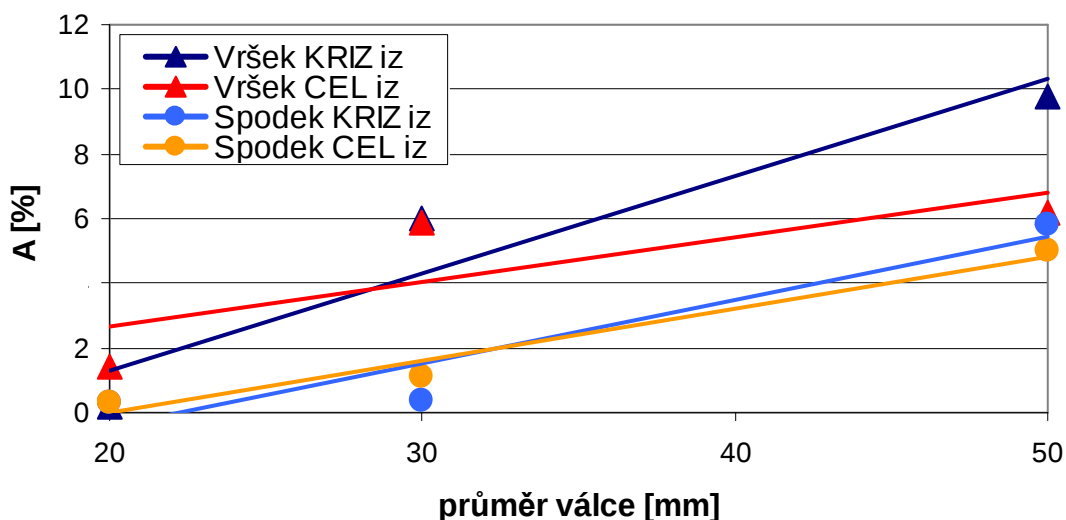


Obr. 9.30 Závislost meze pevnosti na průměru válce a způsobu izolace D10-50

Ze získaných hodnot je patrný vzestupný trend meze pevnosti a tažnosti se zvyšujícím se průměrem válců.

Hodnoty meze pevnosti jsou v případě izolace po obvodu CEL iz ve spodku a vršku vyrovnané. U menších průměrů ($\varnothing 20$ mm) se dosahuje hodnot meze pevnosti CEL iz vyšších (až o 10%) než stejné válce s izolací KRIZ iz, u masivního $\varnothing 50$ mm je situace opačná, bodem zlomu je $\varnothing 30$ mm. Mez pevnosti válců u formy s izolací KRIZ iz je ve vršku oproti spodku výrazněji vyšší (přibližně o 5%).

Závislost tažnosti na průměru válce a způsobu izolace



Obr. 9.31 Závislost tažnosti na průměru válce a způsobu izolace D10-50

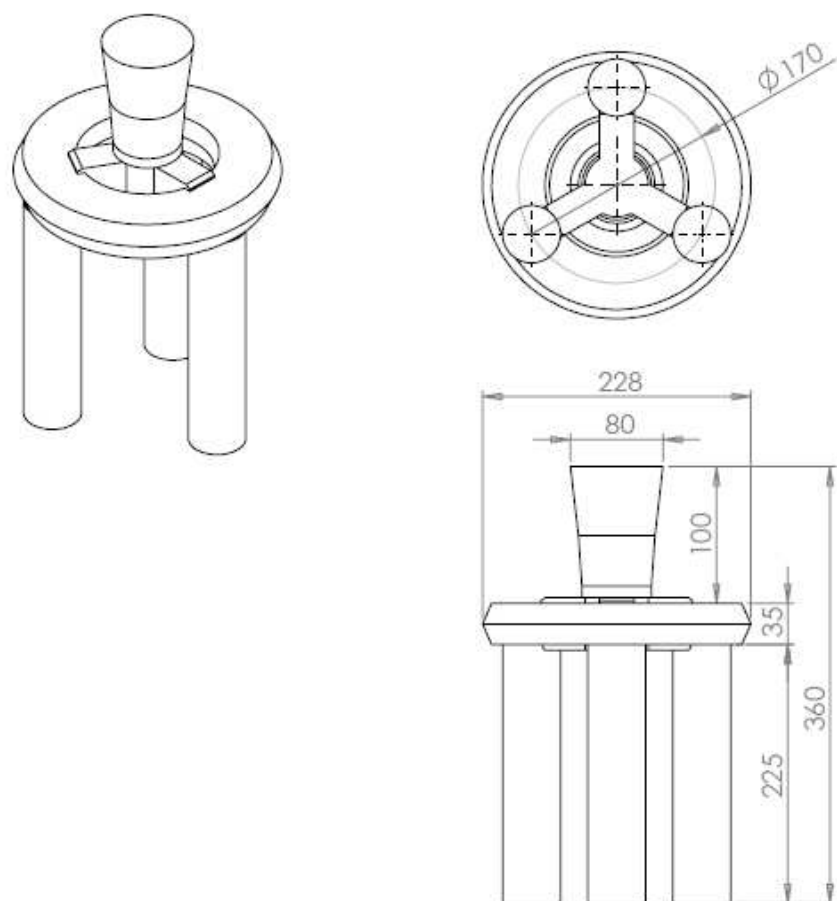
Způsob izolace nemá na tažnost ve spodku výraznější vliv a je vždy nižší než ve vršku. Ve vršku je tažnost u izolace KRIZ iz pro průměr 50 mm výrazně vyšší (o 4 %) než u izolace CEL iz. Pro průměr 20 mm je situace opačná, bodem zlomu je opět průměr 30 mm.

10 EXPERIMENTÁLNÍ FORMY 3xD50

Pro srovnání rychlosti tuhnutí odlitků stejného tvaru s různou izolací byla navržena skořepinová forma tvořená 3 válcovými odlitky stejného průměru $\varnothing 50$ mm a délkou 225 mm, umístěných ve svislé poloze na rozváděcím kroužku ve tvaru mezikruží s centrálním vtokem v ose stromečku. Délka odlitků byla navržena s ohledem na vyloučení tepelného vlivu rozvodného kroužku a konce odlitků.

Označení formy 3xD50.

Geometrické uspořádání je na obr. 10.1.



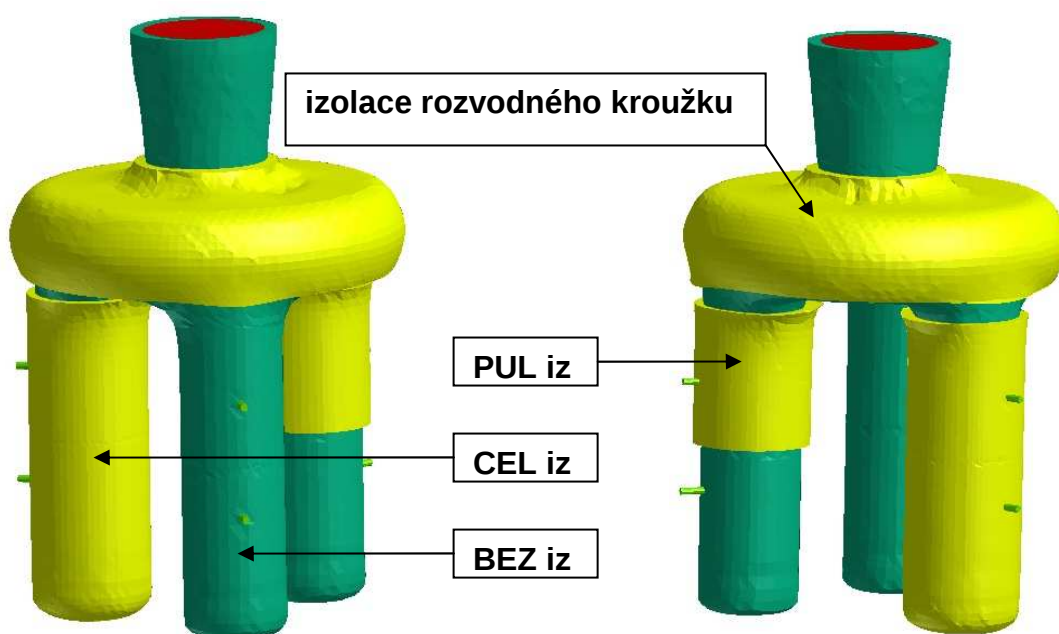
Obr.10.1. Schéma uspořádání zkušební formy 3xD50

10.1 Způsob tepelné izolace skořepiny 3xD50

Izolace skořepiny 3xD50 byla realizována pro obě měření následovně:

- jeden válec ponechán bez izolace (BEZ iz)
- jeden válec izolován po obvodu v horní polovině (PUL iz)
- jeden válec izolován po obvodu po celé výšce (CEL iz)
- rozvodný kroužek izolován po obvodu (Obr.10.2)

Izolace byla provedena jednou vrstvou tkaninou Sibral tloušťky 6,5 mm. Tento způsob izolace byl zvolen z důvodu srovnání teplotního režimu tuhnutí a chladnutí odlitků identického tvaru, avšak s rozdílnou tepelnou izolací.

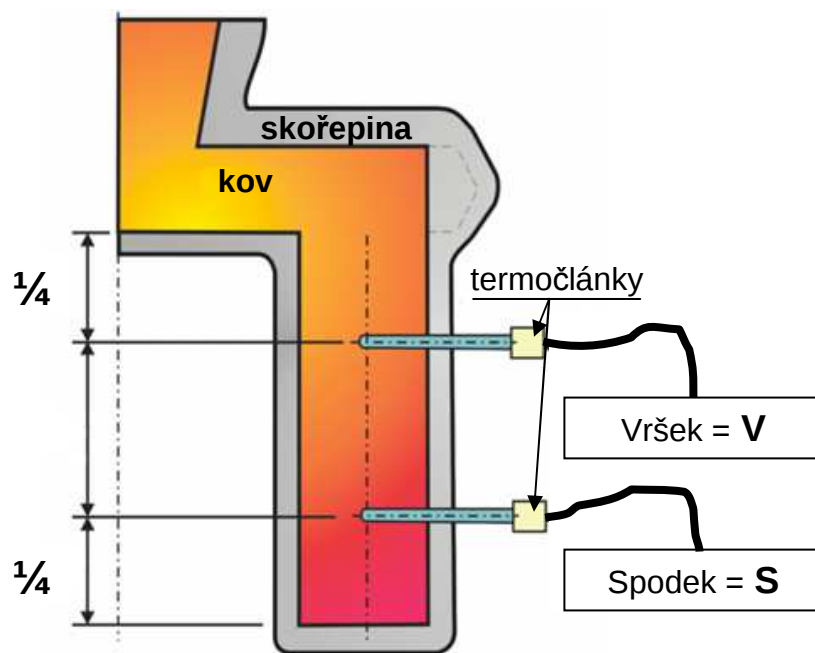


Obr. 10.2 Způsob tepelného ošetření experimentální skořepiny 3xD50

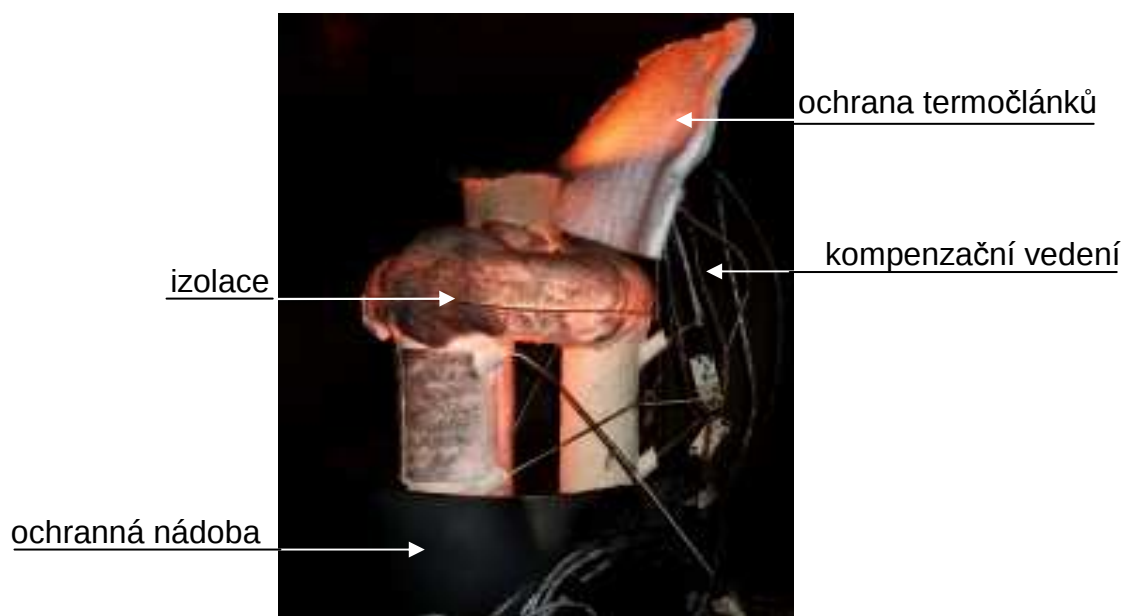
10.2 Průběh teplot skořepin 3xD50

Byla uskutečněna dvě měření se stejným typem izolace forem 3xD50 (obr. 10.4). V každém ze tří válců byly umístěny vždy 2 termočlánky v ose válce (obr.10.3) – v jedné čtvrtině od spodku válců (označení „S“) a v jedné čtvrtině od horního čela válců (označení „V“). Podmínky měření jsou uvedeny v tab. 10.1 a 10.2, grafický průběh teplot v obr. 10.5 a 10.6.

Instalování termočlánku do formy při obou měřeních nebylo zcela ideální, ne všechny se podařilo umístit přesně, při každém měření vždy dva termočlánky měly poruchu.



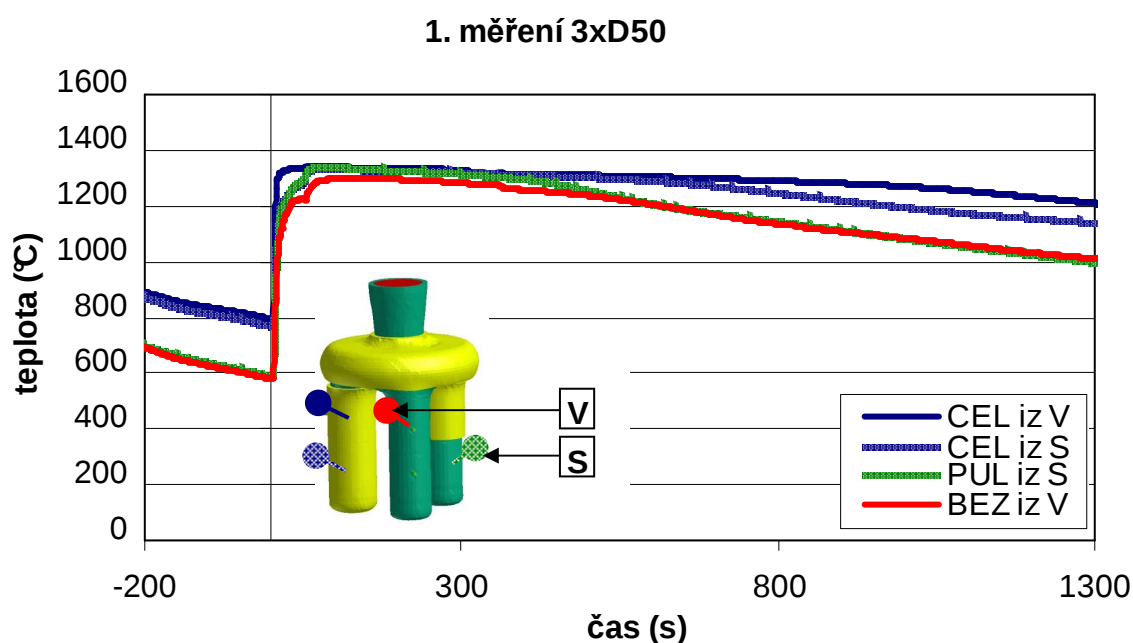
Obr. 10.3 Schéma umístění termočlánků ve skořepině 3xD50



Obr. 10.4 1.měření skořepiny 3xD50 po odlití v kokilové komoře

Tab. 10.1.: Teplotní a časový režim při 1. měření skořepiny 3xD50:

1. měření – 3xD50	
Teplota žíhání skořepiny	1050°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1360°C
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	320 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	562 s
Doba od odlití do zavzdušnění kokilové komory	35 s

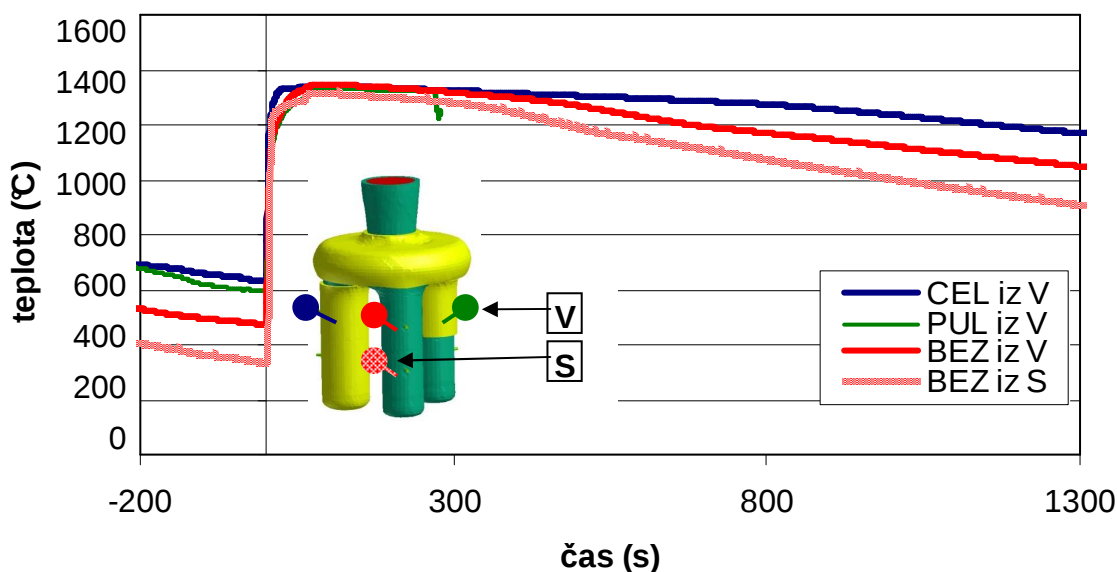


Obr. 10.5 Průběh teplot 1.měření ve skořepině 3xD50
(Pozn. Porucha termočláunku BEZ iz S, PUL iz V)

Tab. 10.2.: Teplotní a časový režim při 2. měření skořepiny 3xD50:

2. měření – 3xD50	
Teplota žíhání skořepiny	1130°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1367°C
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	731 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	922 s
Doba od odlití do zavzdušnění kokilové komory	51 s

2. měření 3xD50



Obr. 10.6 Průběh teplot 2.měření ve skořepině 3xD50
(Pozn. porucha termočlánku CEL iz S, PUL iz S, Pul iz V v čase 280)

10.3 Diskuze výsledků průběhů teplot skořepin 3xD50

Přestože při 1.měření byla skořepina žíhána na teplotu o 80°C nižší (tj. 1050°C) vlivem kratší instalace termočlánku byla její teplota před litím v měřených místech vyšší až o 150°C. Vyšší počáteční teplota formy způsobila posun doby tuhnutí kovu k delším časům. (čas konce tuhnutí: CELizV_{1.měř}=1300 s; CELizV_{2.měř}=1220 s, BEZizV_{1.měř}=720 s; BEZizV_{2.měř}=700 s).

Izolace tloušťky 6,5 mm po obvodu válců výrazně prodlužuje dobu tuhnutí – přibližně 1,8krát oproti válcům bez izolace.

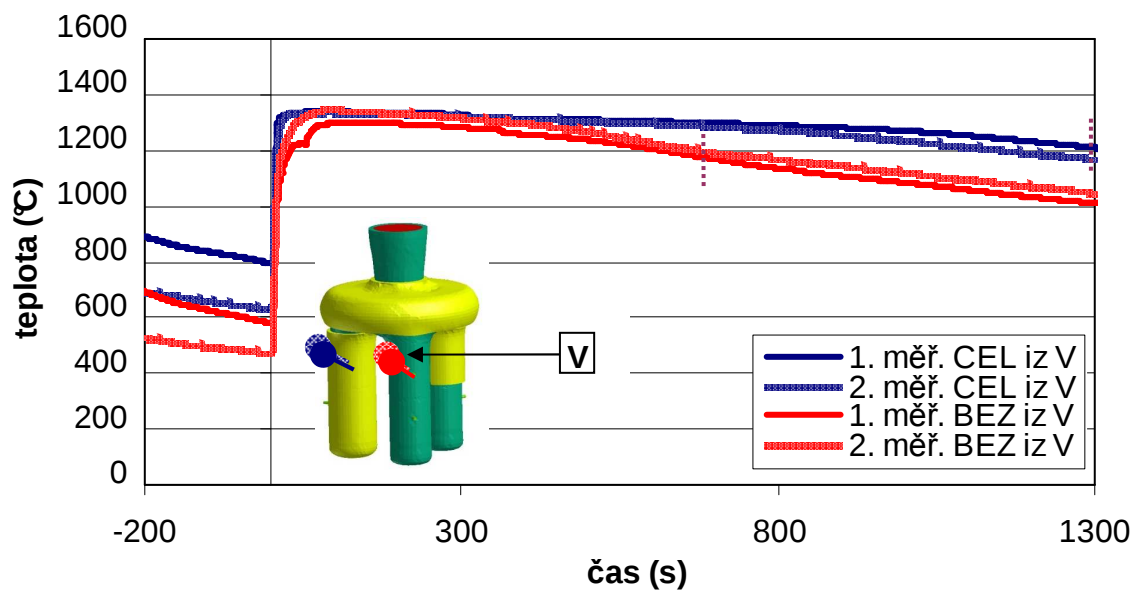
Izolace válce po celém obvodu (CEL iz) vede k výraznému snížení rychlosti chladnutí před litím oproti válci bez izolace (BEZ iz) (rychlosti ochlazování: CELizV_{1.měř}= 0,45 °C/s; CELizV_{2.měř}= 0,51°C/s, BEZizV_{1.měř}= 0,89°C/s; BEZizV_{2.měř}= 0,7 °C/s).

Při pomalejším ochlazování je pak teplota válce CEL iz před litím celkově vyšší a to až o 200°C. (teploty těsně před odléváním: CELizV_{1.měř}= 796 °C; CELizV_{2.měř}= 653 °C, BEZizV_{1.měř}= 576 °C; BEZizV_{2.měř}= 479 °C).

Z obou měření jednoznačně vyplývá velký význam místní aplikace tepelné izolace jakožto velmi účinný prostředek pro ovlivňování průběhu tuhnutí.

Průběhy i číselné hodnoty jsou v obou případech měření 3xD50 velmi podobné, což svědčí o dobré reprodukovatelnosti měření (obr.10.7).

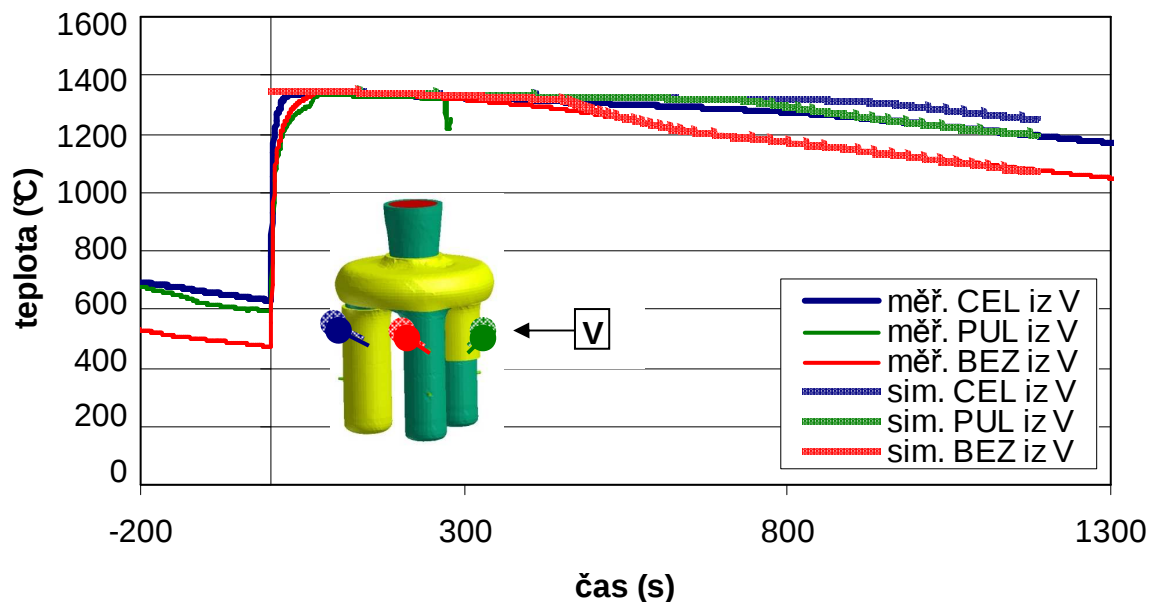
Porovnání 1. a 2. měření 3xD50 - CEL iz V, BEZ iz V



Obr. 10.7 Porovnání průběhu teplot 1. a 2. měření CEL iz V a BEZ iz V ve skořepině 3xD50

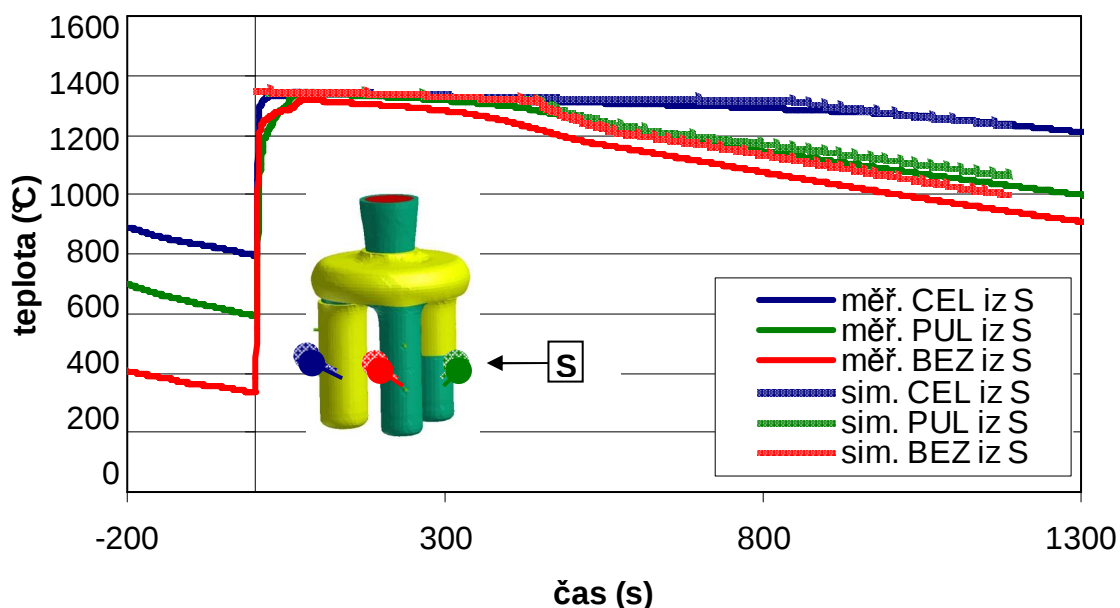
10.4 Numerická simulace tuhnutí odlitků ve formě 3xD50

Porovnání simulace a měření vršku



Obr. 10.8 Porovnání průběhu teplot simulace a 2. měření vršku ve skořepině 3xD50

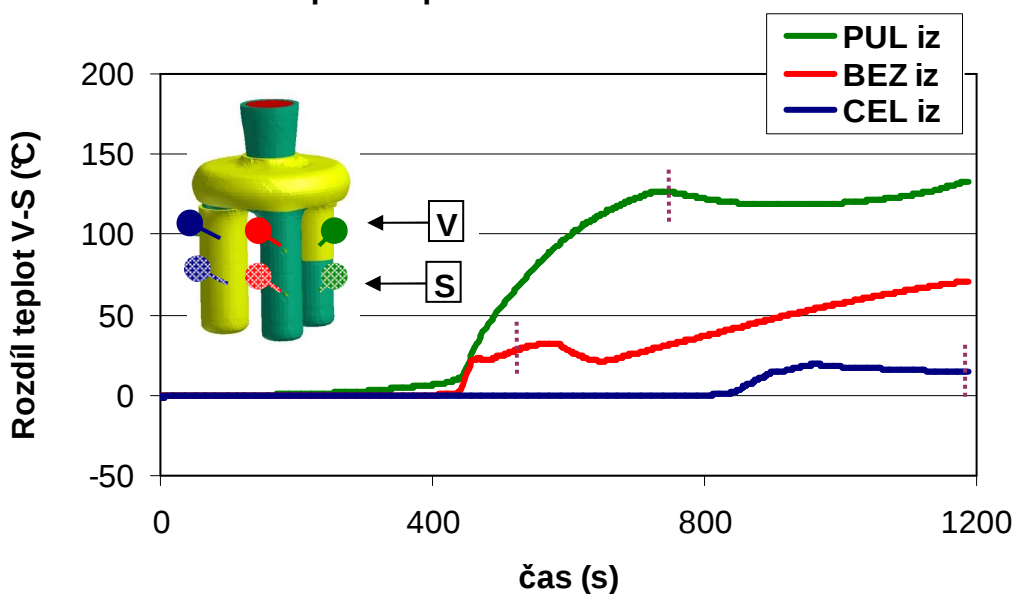
Porovnání simulace a měření spodku



Obr. 10.9 Porovnání průběhu teplot simulace a 1. měření spodku ve skořepině 3xD50 (měř. BEZ iz S z 2. měření)

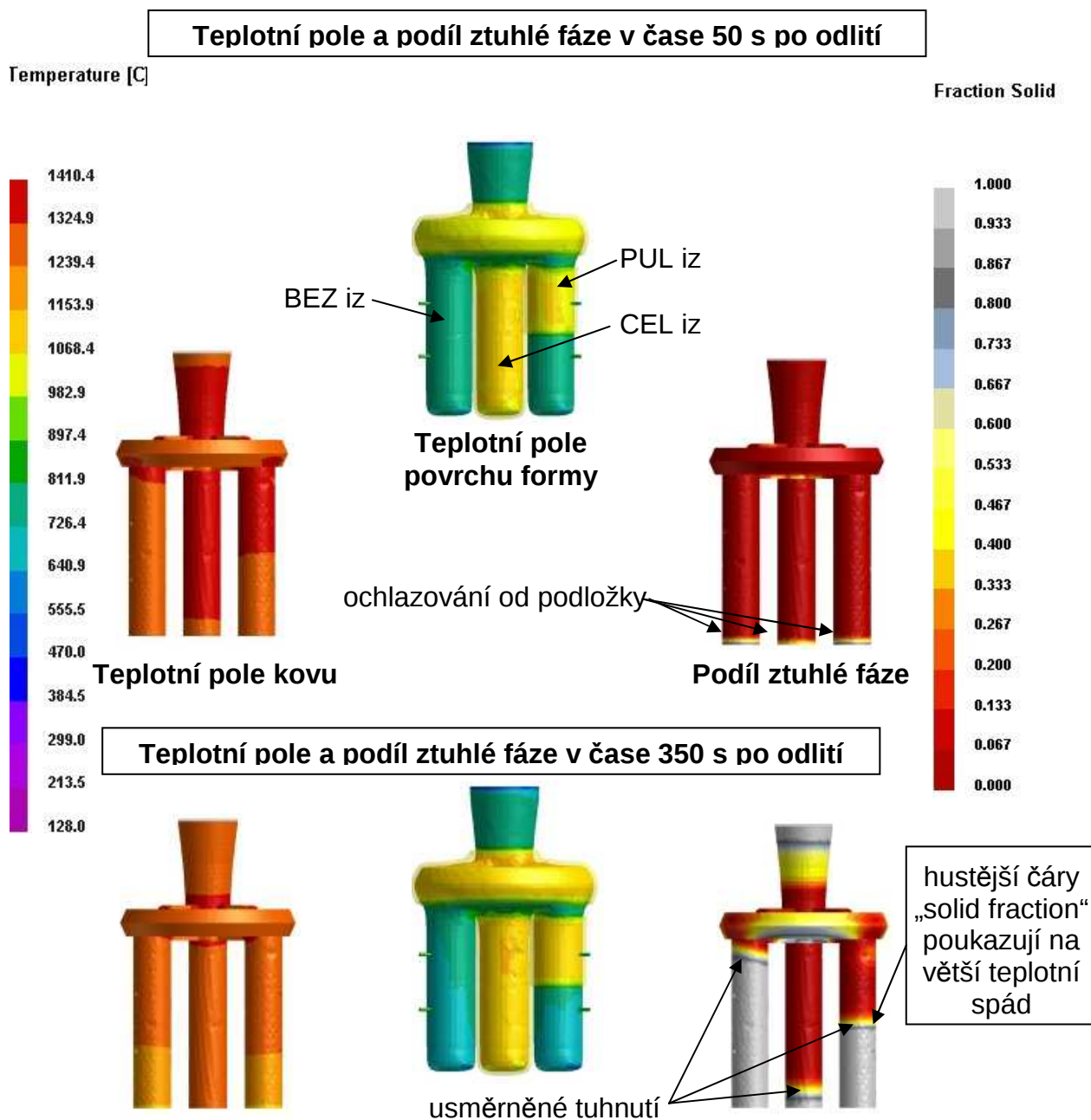
Optimalizované okrajové podmínky přestupu tepla byly bez úprav použity pro simulaci tuhnutí odlitků ve formě 3xD50. Porovnáním naměřených a simulovaných průběhů teplot kovu bylo dosaženo vysoké shody (obr.10.8 a 10.9), přestože okrajové podmínky pro tuto formu nebyly laděny.

Teplotní spád v odlitcích 3xD50



Obr. 10.10 Teplotní spád v odlitcích formy 3xD50 (simulace)

Jak bylo řečeno v KAP.4 Pro správné dosazování kovu je nutný teplotní spád. Teploty v horní části odlitku (V) blíže nálitku musí být vyšší, než teploty ve spodní části (S).



Obr. 10.11 Simulace teplotního pole formy, kovu a podíl ztuhlé fáze v čase 50 a 350 s formy 3xD50

Teplotní spád ve válci bez ohledu na typ izolace je po celou dobu tuhnutí kladný (obr.10.10).

Spád ve válci s celkovou izolací je při tuhnutí (v době kolem 1200 s) velmi nízký (15°C), to je způsobeno zejména zpomalením a zrovnoměrněním ochlazování vlivem izolace.

Spád ve válci bez izolace je při tuhnutí (v době kolem 500 s) vyšší, dosahuje hodnot 25°C, ale i tak není dostatečně strmý pro optimální dosazování.

Spád ve válci s izolací pouze vrchní poloviny (PUL iz) je při tuhnutí (v době kolem 700 s) velmi vysoký (120°C) a je zde docíleno správného dosazování. Teplotní situace v tomto případě je nejpříznivější.

Obr.10.11. ukazuje simulovanou teplotní situaci ve formě. V čase 50s po odlití začíná docházet k usměrněnému tuhnutí kovu od spodních konců válců. V čase 350s postoupila fronta tuhnutí v neizolovaném válci do horní části, ve válci s izolovanou horní polovinou je v tomto čase kov ještě v místech izolace tekutý, v izolovaném válci kov tuhne velmi pomale a je ve většině svém objemu ještě tekutý.

Simulace plně potvrdila závěry, které vyplynuly z experimentálního měření 3xD50.

10.5 Makrostruktura odlitku 3xD50

Různé tepelné ošetření válců formy 3xD50 vedlo k rozdílům v tuhnutí a chladnutí válcových odlitků stejného průměru. Byly proto vyříznuty vzorky z jednotlivých válců, stejně jako v případě D10-50 (viz Kap 9.5). Systém značení vzorků z 3xD50 je v tab.10.3.

Tab. 10.3.: Systém značení vzorků z odlitků 3xD50:

Označení vzorku	Způsob izolace válce	Průměr válce [mm]	Místo odběru vzorku
0V	BEZ iz	Ø 50	vršek
0S		Ø 50	spodek
1V	PUL iz	Ø 50	vršek
1S		Ø 50	spodek
2V	CEL iz	Ø 50	vršek
2S		Ø 50	spodek

Po naleptání půlkruhových vzorků byla vyhodnocena makrostruktura, jejímž cílem bylo stanovit maximální a střední velikost zrna. Počet zrn byl hodnocen na roztečných kružnicích Ø 46 mm. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab.10.4., struktury v tab.10.6.

Ve sledovaných částech válců jsou zrna v horních částech hrubší a jejich počet je menší než v dolních částech, kde jsou zrna jemnější a početnější. Nejvýznamnější rozdíl v počtu je v napůl izolovaném válci.

Z výsledků vyplývá, že použití izolace na válcích vede k zhrubnutí zrna a snížení jejich počtu v místech, kde byla izolace aplikována.

Posun tepelné osy u všech půlkruhových vzorků je nemožné zjistit, z důvodů chybějící druhé poloviny.

Tab. 10.4.: Hodnocení struktury příčných vzorků z odlitků 3xD50:

Označení vzorku	Průměr kružnice D [mm]	Počet zrn n	Střední velikost zrna [mm]	Max. velikost zrna [mm]	Popis struktury
0V	Ø 46	66	4	8	hrubá kolumnární zrna hl. 12 mm, střed hrubá rovnoosá zrna Ø4mm
0S	Ø 46	138	4	8	po obvodu jemná rovnoosá zrna do hl 0,4mm, úzká kolumnární do hl.10 mm, střed rovnoosá zrna Ø4mm
1V	Ø 46	38	3,5	8	hrubá rovnoosá zrna
1S	Ø 46	94	3	7	kolumnární zrna do hl. 4,5 mm, střed rovnoosá zrna Ø4mm
2V	Ø 46	32	6	14	hrubá rovnoosá zrna
2S	Ø 46	53	4,5	10	úzká kolumnární zrna do hl.8mm, střed rovnoosá hrubá zrna Ø7mm

Tab. 10.5.: Porovnání počtu zrn na válcích s různou izolací:

Způsob izolace	Počet zrn n válců na roztečné kružnice Ø 46
BEZ iz (V/S)	66 /138
PUL iz (V/S)	38 / 94
CEL iz (V/S)	32 / 53

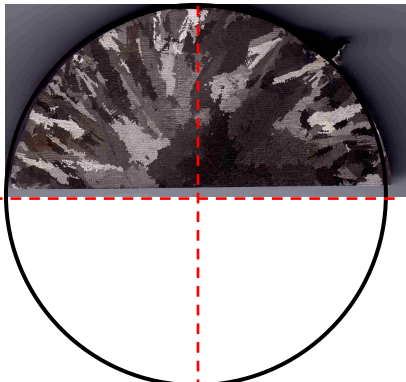
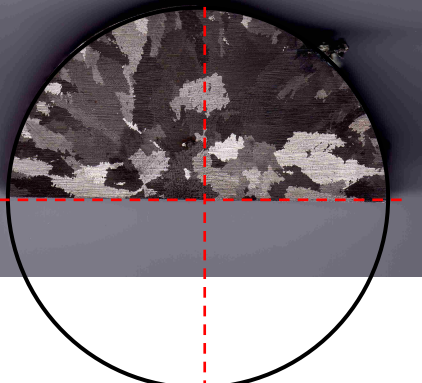
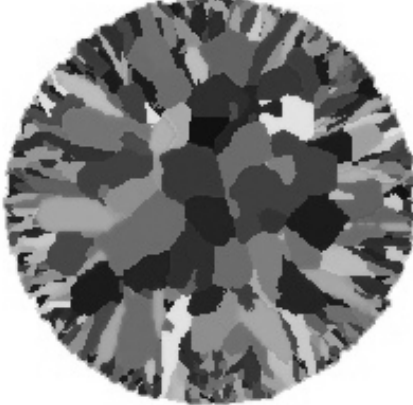
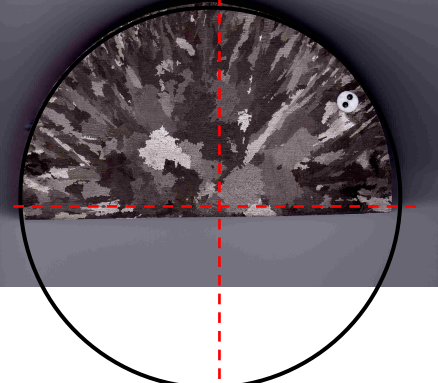
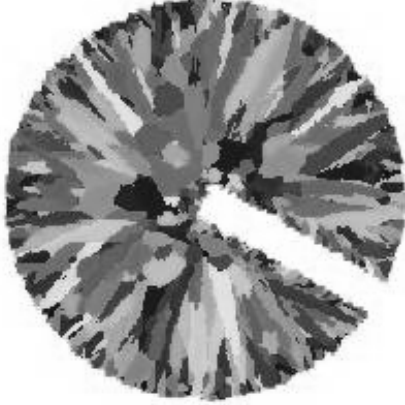
10.6 Numerická simulace makrostruktury odlitku 3xD50

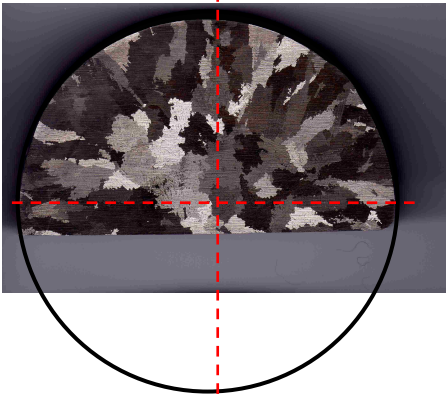
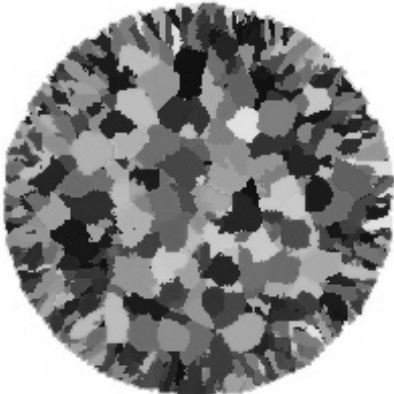
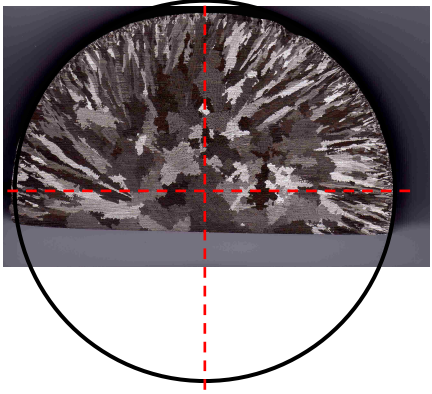
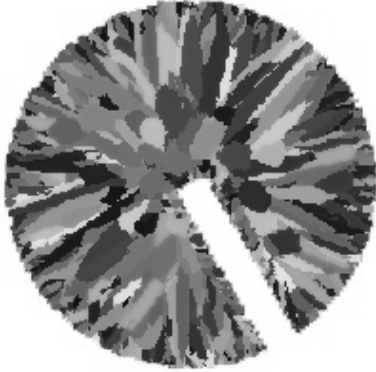
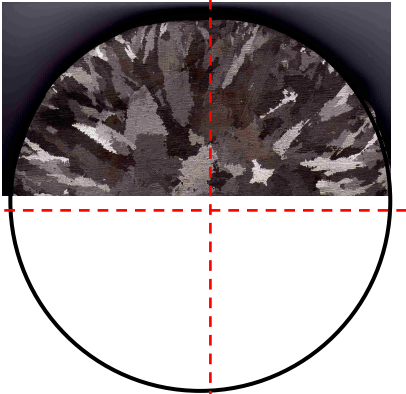
Optimalizované parametry pro simulaci makrostruktury experimentálních odlitků D10-50 KRIZ iz byly použity pro simulaci makrostruktury 3xD50.

Porovnáním reálných vyleptaných struktur se simulovanými (tab.10.6) bylo dosaženo vysoké shody, přestože parametry simulace nebyly pro odlitek 3xD50 laděny.

Obdélníkové mezery v simulovaných strukturách byly způsobeny simulací křemenných trubic pro termočlánky, které byly umístěny v rovině simulovaného řezu.

Tab. 10.6.: Porovnání skutečné a simulované struktury:

Skutečné struktury	Simulované struktury
 2S – CEL iz S	
 2V – CEL iz V	
 1S – PUL iz S	

Skutečné struktury	Simulované struktury
 1V – PUL iz V	
 0V – BEZ iz S	
 0S – BEZ iz V	

10.7 Zkoušky tvrdosti odlitku 3xD50

Pro posouzení tvrdosti byla použita hodnota tvrdosti HV10, měřená na horizontálních obroušených půlkruhových vzorcích, které sloužily pro hodnocení struktury. Značení vzorků je uvedeno v tab.10.3., místa měření jsou znázorněny na obr. 9.29, výsledky měření pak v tab.10.7.

Tab. 10.7.: Hodnoty tvrdosti HV10 měřených vzorků 3xD50:

Označení vzorku	Hodnoty tvrdosti HV10 v měřených místech 3xD50								průměr
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0S	326	336	357	352	329	325	328	334	336
0V	367	358	317	314	355	361	327	321	340
1S	384	343	338	382	364	342	382	364	362
1V	344	320	343	322	323	356	331	324	333
2S	333	313	317	314	351	344	340	343	332
2V	332	323	398	370	374	356	341	383	360

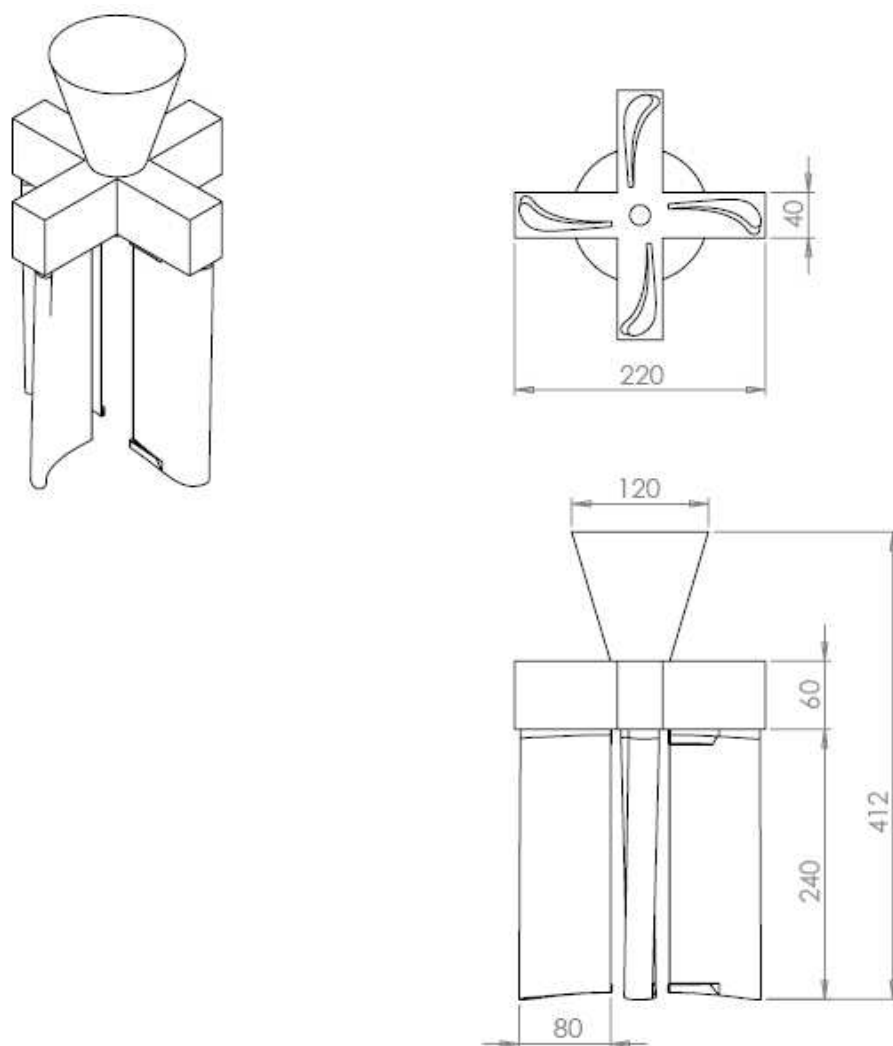
Z naměřených hodnot nevyplyvá žádná jednoznačná závislost, hodnoty mají poměrně velký rozptyl.

11 EXPERIMENTÁLNÍ FORMY LOPATEK

Skořepinová forma je tvořená 4 odlitky lopatek spalovacích plynových turbín délky 240 mm umístěných ve svislé poloze na rozváděcím kříži s centrálním vtokem z keramické nálevky v ose stromečku.

Forma byla navržena pro ověření teplotního režimu běžně odlévaného odlitku ze sortimentu PBS.

Geometrické uspořádání je na obr. 11.1.



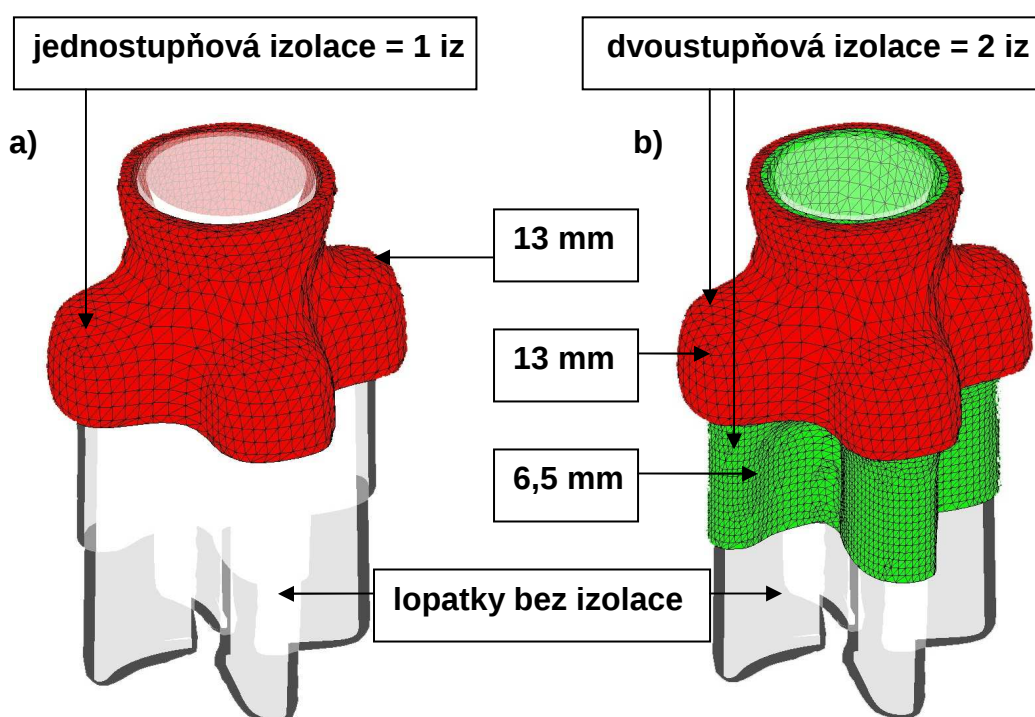
Obr.11.1. Schéma uspořádání zkušební formy s lopatkami

11.1 Způsoby tepelné izolace skořepiny lopatek

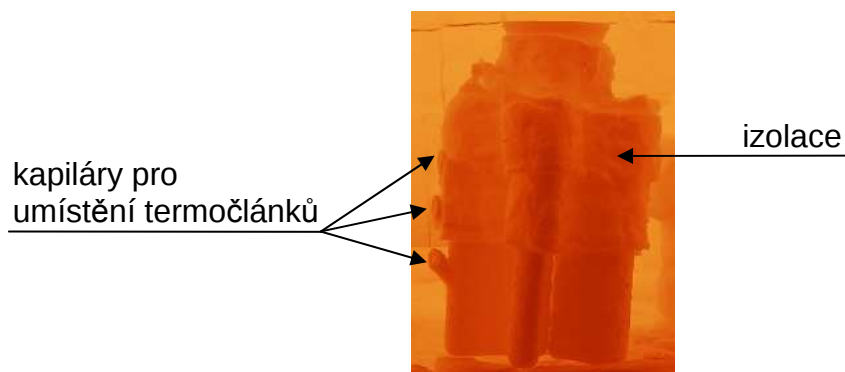
Izolace skořepin lopatek byla provedena ve dvou variantách (obr.11.2):

a) izolován rozvodný kříž s nálevkou jednou vrstvou tkaninou Sibrál tloušťky 13 mm a lopatky ponechány bez izolace – jednostupňová izolace (označení 1iz) (obr 4.2)

b) izolován rozvodný kříž s nálevkou a lopatky v horní polovině po obvodu stromečku jednou vrstvou tkaninou Sibrál tloušťky 6,5 mm a druhou vrstvou rozvodný kříž s nálevkou tkaninou Sibrál tloušťky 13 mm – dvoustupňová izolace. (pozn. lopatky bez druhé vrstvy izolace). Tento způsob izolace je standardně v PBS pro tyto lopatky používán. (označení 2 iz) (obr. 11.3)



Obr. 11.2 Způsob tepelného ošetření experimentálních skořepinových forem lopatek



Obr. 11.3 Skořepina lopatek s dvoustupňovou izolací v žíhací peci

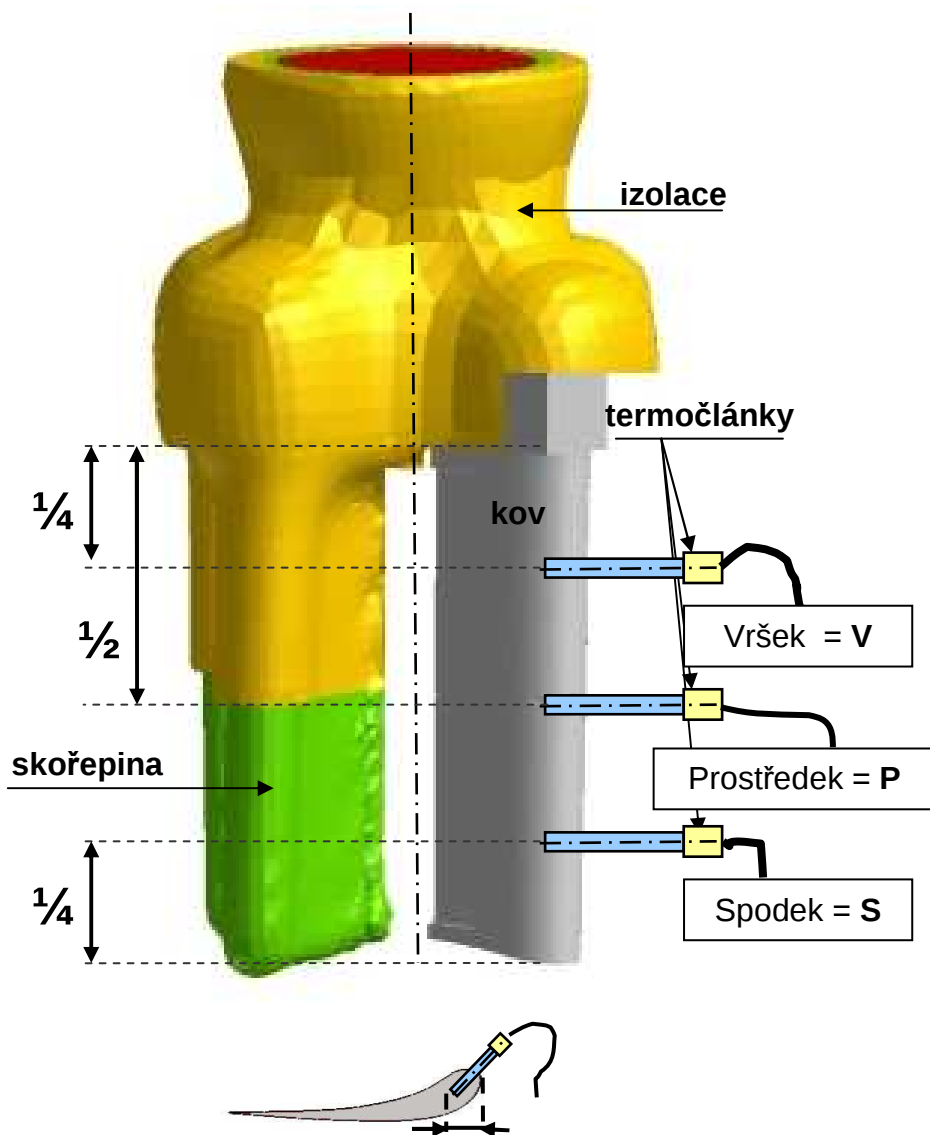
11.2 Průběh teplot skořepiny lopatek

Byly uskutečněny celkem dvě měření skořepiny lopatek, každé s různým typem izolace. Při každém měření byly vždy v jedné ze čtyř lopatek umístěny tři termočlánky pro měření teploty kovu a to v jedné čtvrtině od spodu (S), v jedné polovině (P) a v jedné čtvrtině od vrchu (V). Hloubka zapuštění termočlánku v lopatce byla volena od náběžné hrany tak, aby termočlánek měřil teplotu kovu v největší tloušťce profilu.

Celkové uspořádání termočlánků je zřejmé z obr.11.4.

Po odlití skořepiny a zavzdušnění kokilové komory byla hladina v nálevce zasypána exozásypem Ferro G firmy Mníšek pod Brdy.

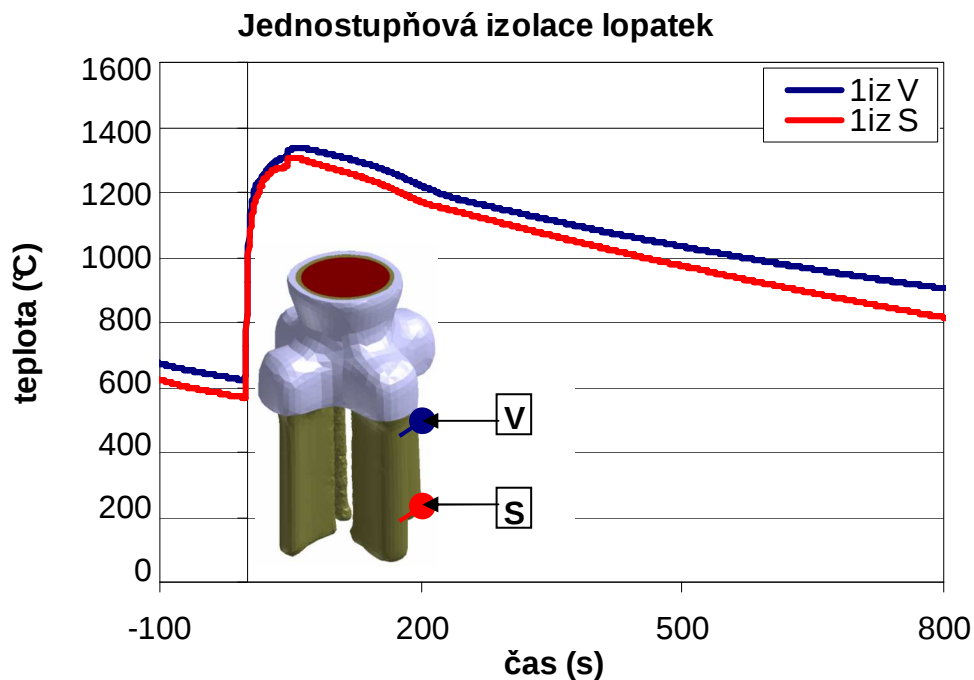
Podmínky měření jsou uvedeny v tab.11.1. a 11.2, grafický průběh teplot v obr.11.5 a 11.6.



Obr. 11.4 Schéma umístění termočlánků ve skořepině lopatek

Tab.11.1.: Teplotní a časový režim při měření skořepiny lopatek 1iz:

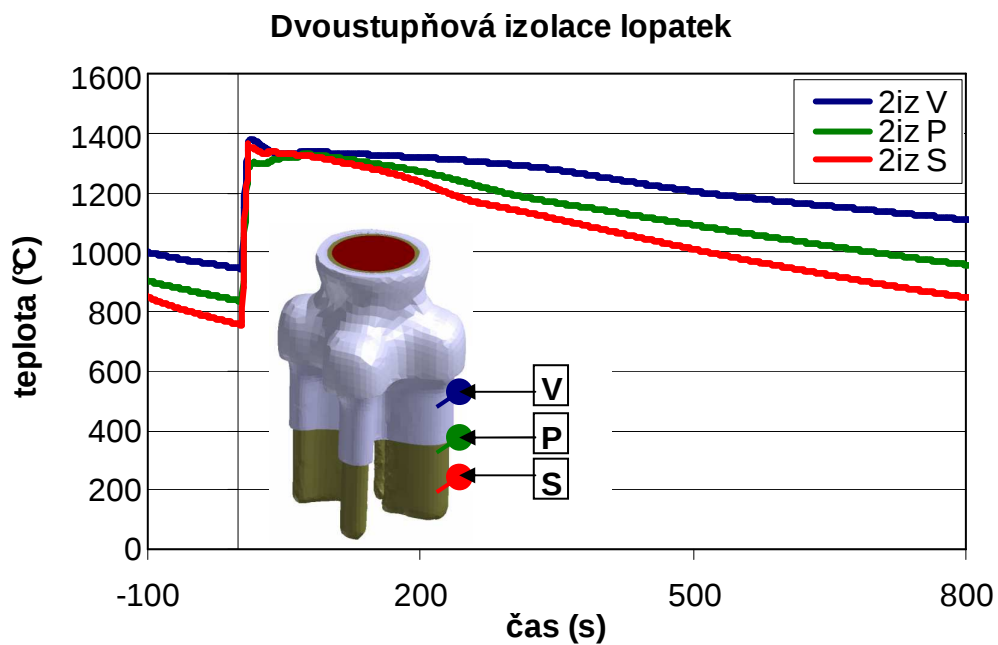
Lopatky s jednostupňovou izolací	
Teplota žíhání skořepiny	1100°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1457°C
Tlak v tavicí komoře	$2,7 \cdot 10^{-3}$ mbar
Tlak při odlévání do formy v propojených komorách	$2,6 \cdot 10^{-2}$ mbar
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	270 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	410 s
Zavzdušnění kokilové komory, aplikace exozásypu	420 s



Obr. 11.5 Průběh teplot ve skořepině lopatek s jednostupňovou izolací
(Pozn. Porucha termočláňku 1iz P)

Tab.11.2.: Teplotní a časový režim při měření skořepiny lopatek 2iz:

Lopatky s dvoustupňovou izolací	
Teplota žíhání skořepiny	1100°C
Licí teplota kovu (INC 713 LC)	1460°C
Tlak v tavící komoře	$2,7 \cdot 10^{-3}$ mbar
Tlak při odlévání do formy v propojených komorách	$2,6 \cdot 10^{-2}$ mbar
Doba od vyjmutí skořepiny ze žíhací pece do uzavření vrat kokilové komory	135 s
Celková doba mezi vyjmutím ze žíhací pece a litím	280 s
Zavzdušnění kokilové komory, aplikace exozásypu	300 s

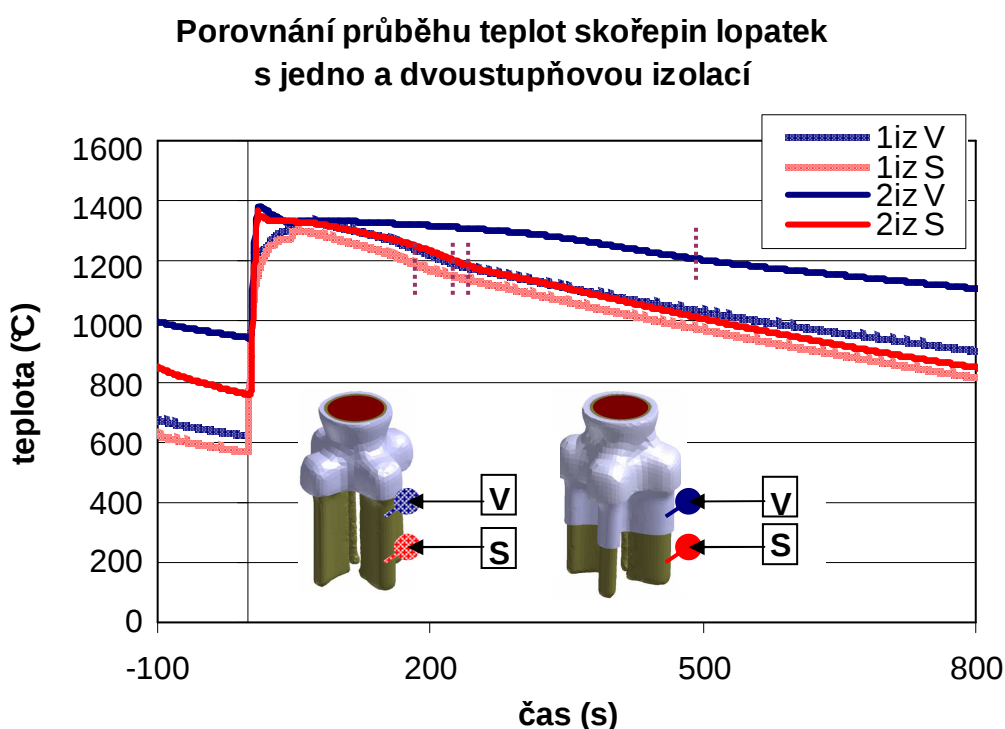


Obr. 11.6 Průběh teplot ve skořepině lopatek s dvoustupňovou izolací

11.3 Diskuze průběhu teplot skořepiny lopatek

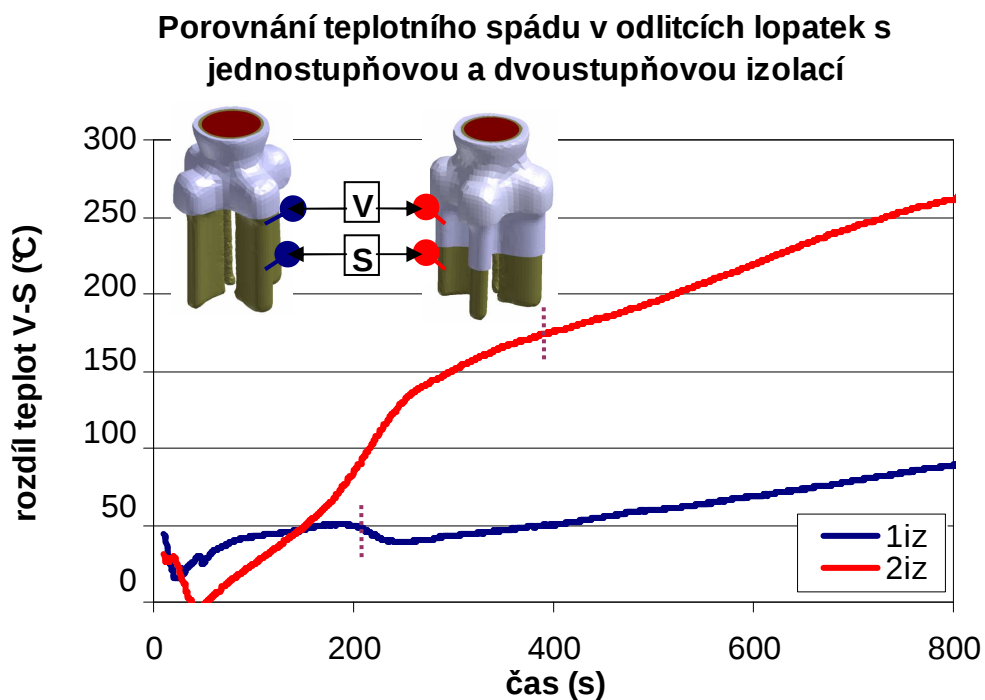
Porovnáním teplot kovu skořepin lopatek lišící se různými typy izolací bylo opět potvrzeno, že aplikace izolace výrazně prodlužuje dobu tuhnutí (čas konce tuhnutí 2iz V= 500 s, 1iz V= 230 s, 2iz P= 300 s, 2iz S= 250 s, 1iz S= 190 s) (obr.11.7).

Izolace formy vede ke snížení rychlosti chladnutí vyžíhané skořepiny před litím v měřených místech ve vršku přibližně dvakrát oproti stejnému místu bez izolace (rychlost chladnutí skořepiny 2iz V= 0,52 °C/s, 1iz V= 1,17 °C/s), ve spod ní části, kde jsou bez izolace obě skořepiny lopatek, je rozdíl v rychlostech ochlazování nevýrazný (rychlost chladnutí skořepiny 2iz S= 1,2 °C/s, 1iz S= 1,3 °C/s).



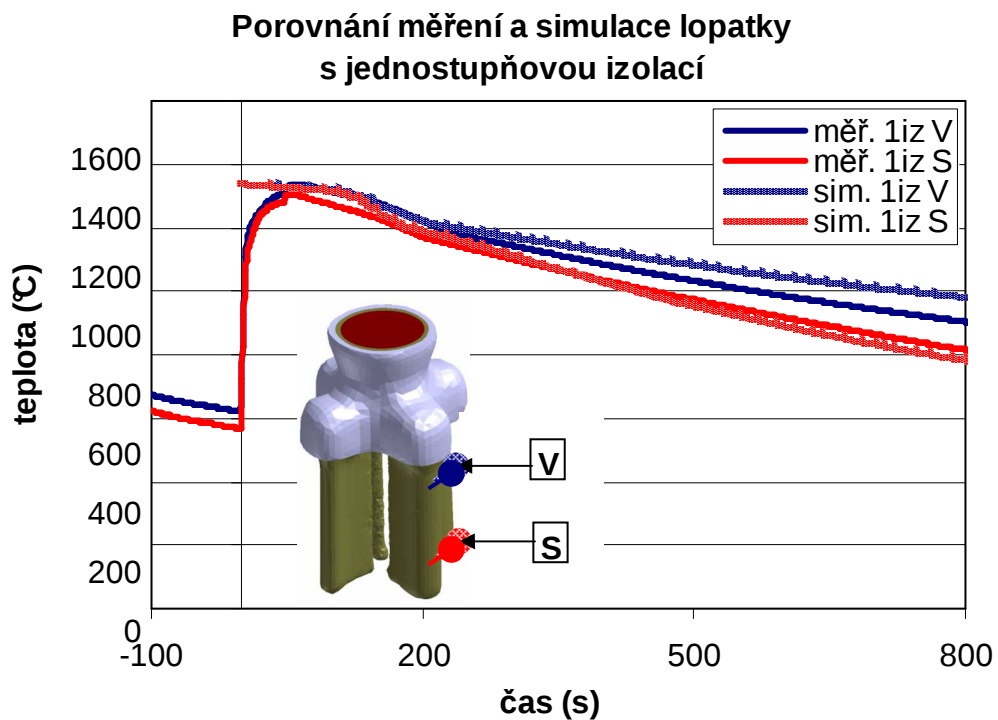
Obr. 11.7 Porovnání průběhu teplot skořepin lopatek s jednostupňovou a dvoustupňovou izolací

Porovnání teplotních spádů jednostupňové a dvoustupňové izolace formy lopatek je na obr.11.8, je zřejmé, že dvoustupňová izolace v době tuhnutí (v době okolo 400 s) zajišťuje daleko výraznější teplotní spád (150°C) a z hlediska dosazování je daleko příznivější oproti jednostupňové izolaci (v době tuhnutí okolo 200s, spád 50°C).



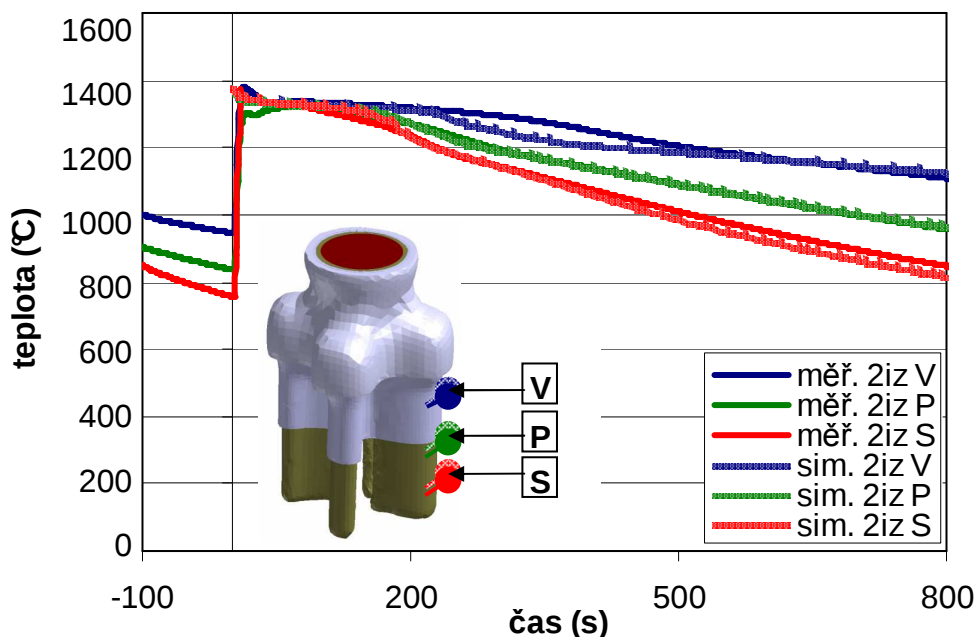
Obr. 11.8 Teplotní spád v odlitcích lopatek s jednostupňovou a dvoustupňovou izolací

11.4 Numerická simulace tuhnutí odlitků lopatek



Obr. 11.9 Porovnání průběhu teplot měření a simulace skořepiny lopatek s jednostupňovou izolací

Porovnání měření a simulace lopatky s dvoustupňovou izolací



Obr. 11.10 Porovnání průběhu teplot měření a simulace skořepiny lopatek s dvoustupňovou izolací

Optimalizované okrajové podmínky přestupu tepla na skořepině D10-50 byly bez úprav použity pro simulaci tuhnutí odlitků lopatek.

Porovnáním naměřených a simulovaných průběhů teplot v kovu (obr.11.9 a 11.10) bylo dosaženo vysoké shody, přestože podmínky pro odlitky lopatek laděny nebyly.

Simulace teplotního pole formy, kovu a podílu ztuhlé fáze ve stejných časech s různým typem izolace je znázorněno na obr.11.11.

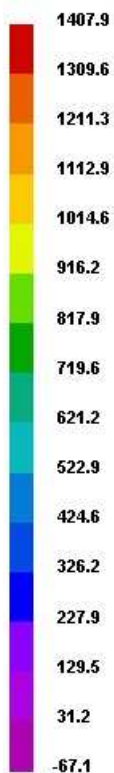
Z obrázku je patrné, že počáteční průběh ochlazování lopatek bez ohledu na způsob izolace je v obou případech stejný a začíná od nejtenčího místa tj. odtokové hrany. Po dosažení zhruba poloviny tloušťky lopatky, začíná převládat ochlazování od podložky a zbývající část tuhne usměrněně směrem k nálitku. V případě dvoustupňové izolace usměrněněji a pomaleji.

Experimentální měření i simulace potvrdily, že používání dvoustupňové izolace na reálných skořepinových formách lopatek má své opodstatnění a lze pomocí ní do jisté míry ovládat teplotní pole jak kovu, tak i skořepiny a účinně ovlivňovat průběh tuhnutí odlitků.

Temperature [C]

dvoustupňová izolace

jednostupňová izolace



teplotní pole skořepiny

50 s



1000 s



teplotní pole skořepiny

50 s

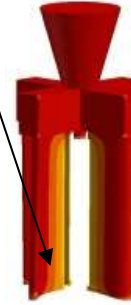
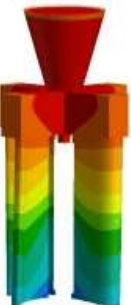


1000 s

ochlazování od odtokové hrany
lopatky bez ohledu na způsob izolace



Fraction Solid



teplotní pole kovu

50 s

v časech

1000 s

teplotní pole kovu

50 s

v časech

1000 s



podíl ztuhlé fáze

50 s

v časech

1000 s

podíl ztuhlé fáze

50 s

v časech

1000 s

Obr. 11.11 Porovnání teplotního pole formy, kovu, podílu ztuhlé fáze v časových okamžicích simulace tuhnutí lopatek

11.5 Makrostruktura odlitků lopatek

Makrostruktura byla hodnocena vždy na odlitku jedné lopatky ze stromečku z každého měření s různou izolací. Z lopatek byly vyrobeny třemi podélnými řezy vzorky, ve stejných místech umístění termočlánků. Systém značení je uveden v tab.11.3.

Po naleptání byla vyhodnocena struktura, jejímž cílem bylo stanovit maximální, minimální a střední velikost zrna a jejich celkový počet. Počet zrn byl hodnocen bez odtokové hrany lopatky, přibližně 10 mm od jejího konce, z důvodů velmi malých jemnozrnných rovnoosých zrn. Ve zbytku struktury se vyskytují pouze větší rovnoosá zrna.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab.11.4 a struktury v tab.11.5.

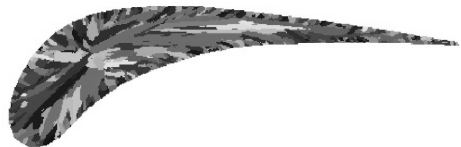
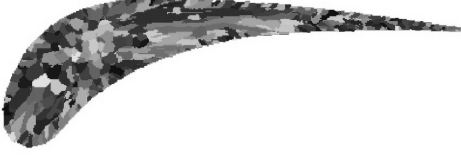
Tab. 11.3.: Systém značení vzorků z odlitků lopatek:

Označení vzorku	Způsob izolace válce	Místo odběru vzorku
1V	jednostupňová izolace 	vršek
1P		prostředek
1S		spodek
2V	dvoustupňová izolace 	vršek
2P		prostředek
2S		spodek

Tab. 11.4.: Hodnocení struktury příčných vzorků z lopatek:

Označení vzorku	Počet zrn n (hodnocen bez odtokové hrany)	Střední velikost zrna [mm]	Min. velikost zrna [mm]	Max. velikost zrna [mm]
1V	72	3,5	0,1	4,5
1P	95	3,5	0,1	4,5
1S	118	3,5	0,5	5
2V	79	3,5	0,2	5
2P	84	3,5	0,5	5
2S	87	4	0,5	5,5

Tab. 11.5.: Skutečné a simulované struktury lopatek:

Skutečné struktury	Simulované struktury
 1V	
 1P	
 1S	
 2V	
 2P	
 2S	

Dvoustupňová izolace lopatek vede k zrovnoměrnění struktury. Počet rovnoosých zrn je ve všech třech sledovaných částech srovnatelný. U jednostupňové lopatky jsou rozdíly v počtu zrn výrazné, ve vršku je o třetinu méně zrn oproti spodku.

Střední velikost zrna je u obou způsobů izolací vyrovnaná, minimální i maximální zrno je u dvoustupňové izolace vždy větší.

11.6 Numerická simulace makrostruktury lopatek

Optimalizované parametry pro simulaci makrostruktury experimentálních odlitků D10-50 byly použity pro simulaci makrostruktur lopatek.

Porovnáním reálných a simulovaných struktur (tab.11.5) nebylo dosaženo dobré shody, neboť u simulovaných lopatek se vyskytují kolumnární zrna rostoucí od odtokové hrany lopatek, na skutečných strukturách se kolumnární zrna nevyskytují.

Pro větší shodu výsledků byla provedena optimalizace dat povrchové a objemové nukleace, ale i po optimalizaci se vždy kolumnární zrna objevila.

11.7 Zkoušení mechanických vlastností lopatek

Pro posouzení mechanických vlastností byly použity zkoušky tvrdosti a pevnosti v tahu.

11.7.1 Zkoušky tvrdosti

Pro posouzení tvrdosti byla použita hodnota tvrdosti HV10, měřená na horizontálních obroušených vzorcích, které sloužily pro hodnocení struktury. Značení vzorků je uvedeno v tab.11.3., místa měření jsou znázorněny na obr.11.12, výsledky měření pak v tab.11.6.

Tab. 11.6.: Hodnocení struktury příčných vzorků z lopatek:

Označení vzorku	Hodnoty tvrdosti HV10 v měřených místech řezů lopatek							
	1	2	3	4	5	6	7	průměr
1V	377	358	361	368	362	370	372	366
1P	365	360	370	366	358	363	357	363
1S	360	363	363	363	369	370	362	364
2V	371	322	358	338	326	326	367	344
2P	365	336	346	351	345	356	341	349
2S	360	354	343	335	367	335	365	351



Obr. 11.12 Místa a počet měření tvrdosti vzorků lopatek

Průměrné hodnoty naměřených tvrdostí jsou u vzorků z lopatek s jednostupňovou izolací vyšší (o15HV) a vyrovnanější než u vzorků s dvoustupňovou izolací. Závislost tvrdosti na místě měření se nepodařilo zjistit.

11.7.1 Zkoušky pevnosti v tahu

Zkoušky pevnosti v tahu byly provedeny na zkušebních tělesech ($\varnothing 5\text{mm}$, $L_0=25\text{mm}$), vyrobených soustružením vždy z jednoho odlitku lopatky ze stromečku při teplotě 20°C . Z každé lopatky byly vyrobeny dvě zkušební tělesa, vždy ze spodní a vrchní části z nejširší části lopatky, systém značení vzorků je stejný jako v předchozích případech. Tahová zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN 10002-1.

Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v tab.11.7.

Tab. 11.7.: Výsledky tahových zkoušek D10-50:

Označení vzorku	Pevnosti v tahu lopatek		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
1izV	743	775	1,6
1izS	716	727	0,8
2izV	748	753	0,8
2izS	760	848	8

Výsledky zkoušky pevnosti v tahu nelze považovat za příliš věrohodné, neboť tažnost většiny vzorků je velmi nízká a je hluboko pod obvyklou hodnotou (min.3% při 20°C). Z měření pevnosti nevyplyvá žádná závislost.

12 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzovat problematiku přestupu tepla při tuhnutí ve skořepinových formách ve vakuu, experimentálně zjistit průběh tuhnutí odlitků ve zkušebních formách, ověřit vliv izolací na teplotní poměry, zjistit struktury kovu a její souvislosti s podmínkami tuhnutí a upřesnit okrajové podmínky numerické simulace tuhnutí a struktury. Tento stanovený cíl se podařilo splnit.

Byl proveden rozbor přenosu tepla z odlitku do skořepinových forem a do okolního prostředí při odlévání ve vakuu. Na nejvýznamnějším odvodu tepla při lití do žíhaných skořepinových forem ve vakuu se podílí sálání. Méně pak odvod tepla vedením přes kontaktní plochu skořepiny na licím poli. Konvektivní odvod ve vakuu je nulový. Osálávání jednotlivých elementů stromečku má za následek nesymetrický odvod tepla při tuhnutí odlitků.

Pro měření teplot experimentálních skořepin při odlévání ve vakuové peci v PBS byl vyvinut systém měření teplot. Termočlánky, kompenzační vedení i A/D převodník byly umístěny ve vakuové peci a přenos dat byl uskutečněn speciální vakuově těsnou průchodkou přes konstrukci pece. Celkem bylo ve vakuové peci odlito a naměřeno sedm experimentálních skořepin, které se lišily tvarem a způsobem tepelného ošetření pomocí izolace. Odlévaným kovem byla slitina Inconel 713LC na bázi niklu.

Z naměřených průběhů teplot bylo zjištěno, že teplotní režim skořepinových forem lze výrazně ovlivnit aplikací místní izolace. Použití izolace na skořepině vede k významnému snížení rychlosti chladnutí vyžíhané skořepiny před litím přibližně na poloviční hodnotu. V okamžiku lití je teplota v izolovaných místech vyšší a celkově homogennější. Při tuhnutí tlustých a tenkých profilů odlitku vede zaizolování ke snížení rozdílů rychlostí tuhnutí a výrazně prodlužuje dobu tuhnutí přibližně na dvojnásobek oproti neizolovaným částem.

Neizolovaná spodní část skořepiny na licím poli urychluje odvod tepla ze spodní části skořepiny a tím podporuje usměrněnost tuhnutí. U odlitků s dlouhou dosazovací vzdáleností je nutné postupně navyšovat tloušťky izolace směrem k nálitku, což vede k lepšímu dosazování kovu. Izolace nálitku (vtokové soustavy) je nutné provést tak, aby tuhnul jako poslední. Stejnoměrnou izolací se usměrněnosti tuhnutí nedosáhne, pouze se prodlouží doba tuhnutí.

Při stanovování vlivu izolace na strukturu a mechanické vlastnosti bylo zjištěno, že izolace podporuje hrubnutí zrn, do jisté míry zrovnoměrňuje strukturu a hodnoty meze pevnosti po celé délce aplikace izolace. Tepelný účinek izolace na hodnoty tvrdosti se nepodařilo zjistit.

Experimentální výsledky byly použity pro verifikaci numerické simulace odlévání a tuhnutí a numerické simulace struktury.

Okrajové podmínky přestupu tepla bylo nutné pro numerickou simulaci optimalizovat. Srovnáním simulovaného a reálného průběhu teplot odlitků byla ve všech experimentálně naměřených skořepinách dosažena velmi vysoká shoda. Takto odladěná data je možno použít i v dalších výpočtech.

Po optimalizaci tuhnutí byla provedena numerická simulace struktury. Doporučované hodnoty povrchové a objemové nukleace byly optimalizovány. Porovnáním reálných a simulovaných struktur bylo u většiny dosaženo dobré shody.

Provedený výzkum přinesl nové poznatky o podmínkách, které jsou používány při výpočtech v simulačním programu ProCast. Nalezené podmínky zpřesnily numerický výpočet a tím přiblížily výpočet reálnému stavu, který se projeví na dokonalejším odhalování vznikajících vad v odlitcích.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MRÁZEK, Martin. Technologie přesného lití. Slévárenství. Září-říjen 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 468-470. ISSN 0037-6825.
- [2] HERMAN, Aleš. Lití na vytavitelný model[online] Studijní opory pro předmět Metody přesného lití II. CVUT Praha. 30 s. Dostupné na WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>
- [3] ZÁDĚRA Antonín. Krystalizace superslitiny na bázi niklu typu INC 713 LC. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie – slévárenství“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie – odbor slévárenství. 2004. 76s.
- [4] ROUČKA, Jaromír a kol. Tepelné procesy při odlévání do samonosných skořepinových forem a jejich numerická simulace. Slévárenství. Září-říjen 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 405-411. ISSN 0037-6825.
- [5] JÍCHA, M. a kol. Přenos tepla a látky. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [6] NAČEV Roman. Numerická simulace lití do skořepinových forem. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie – slévárenství“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie – odbor slévárenství. 2006. 71s.
- [7] NOVÁ, I. Tepelné procesy ve slévárenských formách. 1.vyd. Liberec: Vysokoškolský podnik, 2003. 133 s. ISBN 80-7083-662-8.
- [8] PAVELEK, M. a kol. Termomechanika. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [9] RAŽNJEVIĆ, K. Termodynamické tabulky. 2.vyd. Bratislava: Alfa-Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1984. 313 s.
- [10] Desky z hlinitokřemičitých vláken [online] Dostupné na WWW: <http://www.tesneni-polanka.cz/zim_sibral.htm>
- [11] SCHOLAPURWALLA, Adi a SCOTT, Sam. Účinky přestupu tepla radiací na předpověď jakosti přesně litych odlitků. Slévárenství. Září-říjen 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 433-435. ISSN 0037-6825.
- [12] INCROPERA, FP. And DEWITT, DP. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. NEW YORK: J. Wiley&Sons, 1996, 886 s, ISBN 0-471-30460-3
- [13] [online] Dostupné na WWW: <http://www.pbsvb.cz/dme_vybaveni.php>

- [14] ZEMČÍK, Ladislav. Nekonenční způsoby řízení krystalizace žárovevých slitin niklu pro lopatky spalovacích turbín. Disertační práce v oboru „Strojírenská technologie – slévárenství“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie – odbor slévárenství. 1985. 122 s.
- [15] PODHORNÁ, B. a KUDRMAN, J. Výzkum materiálových vlastností a vývoj nových technologií přesného lití spojených s náhradou kovaných žárovevých slitin za lité struktury. [Zpráva UJP1047]. Praha. 2003, 48 s.
- [16] HAKL, J. a kol. Optimalizace chemického složení lité žárovevé slitiny s cílem prevence vzniku sigma – fáze ve struktuře. Slévárenství. Říjen 2001, roč. L, č.10, s. 601-606. ISSN 0037-6825.
- [17] USTOHAL, V. Struktury a vlastnosti žárovevých niklových slitin 713LC a LVN 10. Slévárenství. [Studie]. Brno. 1971, 112 s
- [18] PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [19] KREIDL, M. Měření teploty, senzory a měřicí obvody. 1.vyd. Praha: BEN-Technická literatura , 2005. 226 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [20] Modules ADAM - 4000[online] Dostupné na WWW: <http://www.advantech.com/products/RS-485-I-O-Modules-ADAM-4000/sub_1-2MLKHT.aspx>