



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE AUTOMOTIVE ENGINEERING

TEPELNÉ IZOLACE A ZÁSYPY JAKO CESTA K
ÚSPORĚ KOVŮ A ENERGIÍ VE SLÉVÁRENSTVÍ
THERMAL INSULATION AND BACKFILLING AS A WAY TO SAVE METAL AND ENERGY IN
FOUNDRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN KOS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. FRANTIŠEK KAVIČKA, CSC.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Kos

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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 bakalářské práce:

Tepelné izolace a zásypy jako cesta k úspoře kovů a energií ve slévárenství

v anglickém jazyce:

Thermal insulation and backfilling as a way to save metal and energy in foundry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se formou literární rešerše tuzemské i zahraniční literatury seznámí a posoudí principy a druhy tepelných izolací a zásypů s cílem dosáhnout usměrněné teplotní pole jako nezbytný předpoklad zdravého odlitku. Seznámí se také s hlavními metodami řešení teplotního pole soustavy odlitek-forma (izolace)-okolí k výpočtovému posouzení či předpovědi stupně usměrněnosti tuhnutí.

Cíle bakalářské práce:

Shrnutí a posouzení principů a druhů tepelných izolací a zásypů k dosažení usměrněného tuhnutí s přihlédnutím ke kontrole resp. predikci utváření teplotního pole odlitku po odlití.

Seznam odborné literatury:

Kavička F.: Termokinetika tuhnutí, ochlazování a ohřevu. Učební texty VUT-FSI Brno, 1993, 153 stran

Pavelek M. a kolektiv: Termomechanika. Učební texty VUT-FSI Brno, 2011, 192 stran

Cengel Y.A., Boles M.A.: Thermodynamics an engineering approach McGraw-Hill, Inc., USA, 1999, 867 stran

Kuneš J.: Modelování tepelných procesů. SNTL Praha, 1989, 423 stran

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. František Kavička, Csc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D,
Děkan

Abstrakt

Byly shrnuty druhy, principy a termofyzikální vlastnosti tepelných izolací a zásypů i jejich využití ve slévárenství s cílem zajistit usměrněné tuhnutí odliteků a tím jejich kvalitu. Je shrnuta nezbytnost numerické simulace teplotního pole soustavy odlitek-forma (jádro)-okolí ke kontrole a predikci usměrněného tuhnutí. Jsou uvedeny některé komerční softwary využívající různé modely tuhnutí. Jako příklad použití jednoho z modelů je uveden postup, jak se předem výpočtem rozhodnout, která ze dvou možných izolací nálitku bude účinnější.

Klíčová slova

teplotního pole, metody řešení, numerický model, komerční softwary, usměrněné tuhnutí, tepelný gradient, tepelný uzel, chlazení, nálitkování, tepelné izolace a zásypy a jejich výběr

Abstract

Types were summarized, principles and thermo-physical properties of thermal insulation and backfilling and their use in the foundry industry to provide directionally solidified castings and then their quality. It summarized the need for numerical simulation of thermal field system casting-form (core)-around the control and prediction of directional solidification. They are some commercial software using different models of solidification. As an example, using one of the models describe the procedure as a pre calculation to decide which of two possible isolation of the riser will be more effective.

Keywords

temperature field, solution methods, numerical model, commercial software, directionally solidified, thermal gradient, thermal node, cooling, feeding, thermal insulation and backfilling and their selection

Bibliografické citace

Kos, J. Tepelné izolace a zásypy jako cesta k úspoře kovů a energií ve slévárenství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015 61s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. František Kavička, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Františka Kavičky, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne: 25. 5. 2015

.....
Jméno a příjmení

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce prof. Ing. Františku Kavičkovi, CSc. za jeho trpělivost a rady. Dále kolegům z mého pracoviště, hlavně Ing. Jindřichu Šustrovi a mé rodině, která mě podporovala.

1.	Úvod.....	8
2.	Metody řešení teplotních polí odlitků a formy při tuhnutí.....	9
2.1	Metody experimentální	9
2.2	Metody výpočtové.....	9
3.	Matematický model teplotního pole odlitku a formy	12
3.1	Diferenční tvar Fourierovy rovnice.....	13
3.2	Okrajové podmínky řešení	15
4.	Komerční software.....	17
4.1	Software NovaFlow&Solid	17
4.2	Software Pal-Cast.....	17
4.3	Software Magma a virtuální testovací pole, propojení mezi klasickou simulací a optimalizací	17
5.	Usměrněné tuhnutí	22
5.1	Teplotní gradient	22
5.2	Tepelný uzel	25
6.	Nálitkování.....	26
6.1	Přirozené nálitky	26
6.2	Mini nálitky.....	26
6.3	Dělení nálitků do skupin	26
7.	Tepelné izolace a zásypy	28
7.1	Tepelné izolace.....	28
7.2	Exotermické zásypy	47
8.	Příklad využití numerického modelu k výběru izolace.....	51
8.1	Zadání, jeho rozbor a příprava řešení.....	51
8.2	Výsledky řešení a jejich diskuze	52
8.3	Dílčí závěr	54
9.	Závěr	55
10.	Seznam použitých zdrojů.....	56
11.	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	57
12.	Seznam obrázků a grafů.....	58
13.	Seznam tabulek	60

1. Úvod

Tepelné izolace a zásypy umožňují uspořít odlévané kovy i energii. Současně pomáhají optimalizovat proces odlévání a snižovat celkové náklady na výrobu odlitku.[1]

Při tuhnutí a chladnutí odlitků dochází k nestacionárnímu 3D přenosu tepla a hmoty v soustavě odlitek-forma (jádro)-okolí. Pro zjednodušení se přenos hmoty zanedbá. V přenosu tepla je rozhodující jeho vedení popsané parciální diferenciální rovnicí Fouriera. Její řešení musí též vyhovovat tzv. počátečním a okrajovým podmínkám. Jde o výrazně nelineární úlohu, protože termodynamické vlastnosti všech součástí soustavy i okrajové podmínky se mění s teplotou. Znalost teplotního pole v této soustavě je dnes již pro slévářenskou technologii nezbytné. Rozvoj hardwaru a softwaru přináší nové možnosti optimalizace, předpovědi kvality a vlastnosti vyráběných odlitků pomocí simulačních programů, z nichž některé lze aplikovat i v reálném čase. [2]

2. Metody řešení teplotních polí odlitků a formy při tuhnutí

2.1 Metody experimentální

Vylévací zkouška

Jde o jednu z nejstarších a dříve nepoužívanějších metod stanovení průběhu tuhnutí. Spočívá v tom, že řada stejných forem je zalévána a pak vylévána v předem stanovených časových intervalech po nalití. Následuje změření tloušťky ztuhlé kůry kovu ve formě. Touto metodou se v podstatě získá jediná veličina a to rychlost tvoření kůry. Vylévací zkouška se často používala na ocelových ingotech. Nebyla vhodná pro neželezné slitiny s dlouhým intervalem a širokým pásmem tuhnutí, ani pro experimentální výzkum tuhnutí v pískové formě. Vylévací zkouška patří k metodám historickým.

Modelování lehkotavitelnými materiály

Modelování tuhnutí pomocí lehkotavitelných materiálů mělo nahradit, podobně jako vylévací zkouška, teoretická řešení. Modelování spočívá v odlití a rozřezání modelu z lehkotavitelného materiálu, který je tvarově shodný se zkoumaným odlitkem, a sledovat tak vliv různých technologických faktorů na velikost, polohu a tvar staženiny, případně sledovat rozdíly v průběhu tuhnutí jednotlivých průřezů odlitku vizuálně nebo pomocí střídavě zbarvené modelující kompozice.

Přímé měření teploty

Vzhledem k tomu, že tepelné pochody, které chladnutí odlitku nebo ingotu provázejí, ať v tuhé či tekuté fázi, jsou velmi složité. Do nedávné minulosti bylo možné použít pro jakoukoli soustavu odlitek (ingot)-forma-okolí a to i pro nejsložitější tvarové konfigurace, prakticky jedinou experimentální metodu, a to metodu přímého měření teplot. Obecné použití má měření pomocí termočlánků. Je nutné si uvědomit, že výsledky měření jsou zatíženy objektivními chybami měření, ať už jsou to chyby soustavné, dané povahou metody, vlastnostmi přístrojů a pozorovatele, nebo náhodné, způsobené nepravidelnými účinky.

Je třeba dodržovat základní zásady a předpisy pro měření, mezi jiným i požadavek reprodukovatelnosti měření. Měření teplot odlitku a formy ve slévárně nebo huti za plného provozu probíhá ve ztížených podmínkách. V daném stádiu výzkumu termokinetiky tuhnutí byly a jsou výsledky metody přímého měření, přes všechny její naznačené nedostatky nezbytné k rozvoji metod výpočtových a k jejich konfrontaci s fyzikální realitou. [2]

2.2 Metody výpočtové

Analytické metody

Řešení rovnice vedení tepla analytickými metodami je známo pouze v omezeném počtu případů, vesměs jen pro úlohy jednorozměrné, tedy prakticky pouze pro jednorozměrnou Fourierovou rovnici za zjednodušujícího předpokladu že λ, ρ, c jsou konstanty.

Pro složitější případy z technické praxe nebývá použití analytických metod možné. Analytická řešení zjednodušených modelů tuhnutí nepřinesla ani v dřívějších letech uspokojivé výsledky, i když ve své době byla nesporně přínosem.

Neumanovo řešení

počítá s řešením polomasivu o počáteční teplotě $T_0 = T_{Litf} > 0^\circ C$. Povrchová rovina se náhle ochladí na $T_p = 0^\circ C$ a zůstane konstantní. V ose X probíhá vedení tepla v čase $\tau = 0$ (Obr. 1).



Obr. 1: Tuhnutí polonekonečného odlitku podle Neumanna [2]

$$x = 0 \Rightarrow T_p = 0^\circ C$$

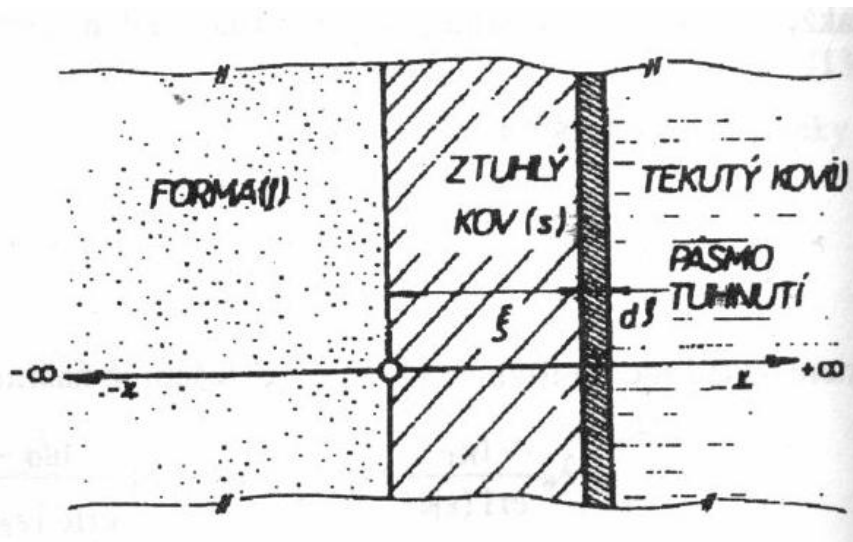
$$x > 0 \Rightarrow T(x,0) = T_0 = T_{Litf}$$

Zjednodušující předpoklady:

- Odlitek na obr. 1 je polonekonečný.
- Tepelný tok je jednorozměrný v ose X .
- Rozhraní mezi tuhou fází a taveninou je rovina.
- Na rozhraní fází je dokonalý fyzikální styk.
- Teplota $T_p = 0^\circ C$ a je konstantní.
- Tuhnutí probíhá za konstantní teploty.
- Termofyzikální parametry tekuté a pevné části se liší, ale jsou nezávislé na teplotě.
- V tavenině nedochází ke konvekci.

Schwarzovo řešení

je rozšířeno na formu, ve které odlitek tuhne jako jeden polomasiv $x \in (-\infty; \infty)$. Forma je uvažována jako druhý polomasiv $x \in (-\infty; 0 >$ viz Obr. 2. V čase $\tau = 0$ dojde k náhlému a dokonalému fyzikálnímu kontaktu odlitek-forma bez ohledu na to, zda je forma kovová nebo nekovová.



Obr. 2: Tuhnutí polonekonečného odlitku podle Schwarze [2]

Zjednodušující předpoklady:

- Forma a odlitek jsou polonekonečné.
- Rozhraní forma-kov rozhraní tavenina-tuhá fáze je rovina.
- Na obou rozhraních je dokonalý fyzikální kontakt.
- Tuhnutí probíhá za konstantní teploty tuhnutí.
- Teplota na kontaktu fází je konstantní a rovna teplotě tuhnutí.
- Teplota na kontaktu forma-kov je v každém okamžiku konstantní.
- Tepelný tok je jednorozměrný ve směru osy X .
- Termofyzikální parametry obou fází kovu i materiálu formy se liší, ale jsou nezávislé na teplotě.
- Nedochozí ke konvekci v tavenině.

Numerické a analogové metody

jsou pro řešení termokinetiky tuhnutí perspektivní. Nekladou si za cíl exaktní řešení, nýbrž výsledky aproximují s různou chybou aproximace. Proto jako jediné mají naději na úspěch. Řešení spočívá v náhradě diferenciálních rovnic rovnicemi diferenčními, provedením prostorové a časové diskretizace. Analogové metody jsou dnes již překonané.

Prostorová diskretizace spočívá v rozdělení objektu na elementární objemové elementy. Těžiště elementu je nositelem všech fyzikálních charakteristik např. teploty, vodivosti, měrné teplo, hustoty a dalších., které jsou v celém jeho objemu konstantní. Všechny parametry se skokově mění až na hranicích se sousedními elementy.

Časová diskretizace je rozdělení daného děje na krátké časové kroky $\Delta\tau$ (časové úseky). V rozmezí jednoho časového kroku je teplota a ostatní parametry elementu konstantní. Po uplynutí kroku se fyzikální veličiny skokem mění na nové hodnoty, které budou zase stále během následujícího časového kroku. Myšlená těžiště objemových elementů se stanou uzly výpočtové sítě. [2]

3. Matematický model teplotního pole odlitku a formy

Tuhnutí a chladnutí taveniny ingotu nebo odlitku a současný ohřev formy (kovové nebo nekovové) a jader je z hlediska nauky o přenosu tepla případ nestacionárního prostorového (třírozměrného) přenosu tepla a hmoty. Jedná se tedy o velmi komplikovaný problém, který přesahuje možnosti klasických exaktních metod. Soustavu odlitek (ingot)-forma-okolí je nutno řešit jako celek.

I přes snahu řešit zadaný úkol komplexně, ukazuje se nutnost rozdělit řešení na několik etap. V první etapě je účelné se zaměřit na přenos tepla v soustavě při nutném zjednodušení, že z jeho tří druhů tepla, kterými se teplo v odlitku (ingotu) a formě šíří, je rozhodující vedení (v odlitku vedení tepla s vnitřním zdrojem v podobě latentního tepla). Ukazuje se, že dosažené výsledky, i přes toto zjednodušení za dané úrovně výpočetní techniky i odborných znalostí o procesu tuhnutí a chladnutí, jsou velkým přínosem pro technickou praxi a výrazným krokem kupředu.

Nestacionární vedení tepla v odlitku a ve formě je popsáno parciální Fourierovou diferenciální rovnicí, která matematicky představuje popis časové změny teploty T v libovolném místě tělesa, vyvolané výsledným přenosem tepla a působením zdrojů energie.

Zápis rovnice v kartézských souřadnicích:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{zdr}. \quad (1)$$

V některých případech kontinuálního nebo opakovaného kokilového lití může nastat stacionární nebo téměř stacionární případ vedení tepla v odlitku a ve formě. Stacionární vedení tepla je popsáno Laplaceovou parciální diferenciální rovnicí.

Přes veškeré výpočtové obtíže, které proces tuhnutí a chladnutí zahrnuje, je nutné problém řešit, protože teplotní pole, jako souhrn okamžitých hodnot teploty ve všech bodech odlitku (ingotu) nebo formy a jeho utváření v průběhu celého procesu je jedním z rozhodujících činitelů, které ovlivňují kvalitu a hospodárnost výroby.

S ohledem na značný rozsah teplot (od teploty ve slévárně, huti nebo laboratoři až po teplotu tavení případně lití technických kovů a slitin) je nutno při řešení Fourierovy rovnice respektovat proměnlivost termodynamických vlastností (tepelné vodivosti λ , měrného tepla c a měrné hmotnosti ρ_v) s teplotou T .

Z těchto skutečností je nutné vycházet při volbě vhodné metody, která umožní řešení třírozměrných teplotních polí. Řešení Fourierovy rovnice musí též vyhovět počátečním a okrajovým podmínkám řešení. Formulace okrajových podmínek je většinou technicky obtížná.

Model teplotního pole

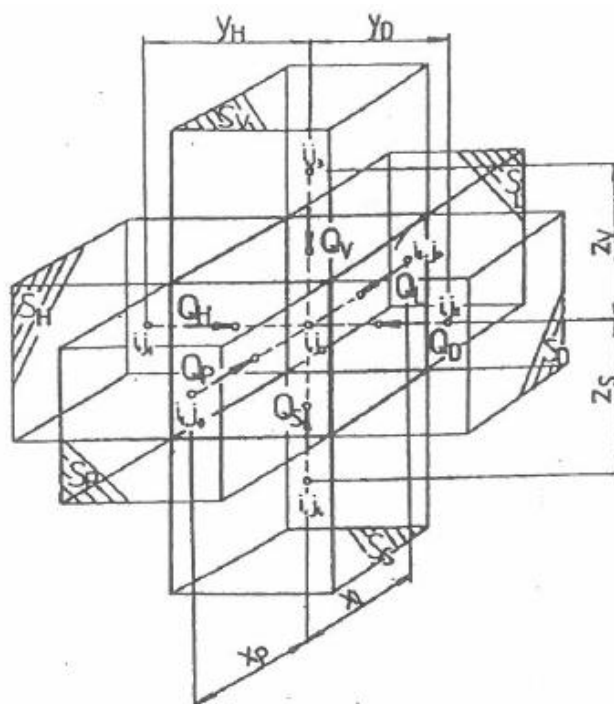
Naději na úspěch řešení nastíněné problematiky mají jen metody analogové (dnes již překonané) a numerické za využití číslicových počítačů. Z těchto jsou k řešení Fourierovy rovnice nejčastěji používány metody sítí a metoda konečných prvků. Řešení aproximují s různě velkou chybou aproximace. Diferenciální rovnice (1) se převede do diferenčního tvaru prostorovou a časovou diskretizací. Je-li derivace teploty podle času nahrazena dopřednou diferencí $[(T^{(k+1)} - T^k)/\Delta\tau]$, je výpočtová metoda explicitní. Její tvar dovoluje v každém uzlu zvolené výpočtové sítě explicitně vypočítat teplotu $T^{(kj+1)}$ v následujícím časovém okamžiku, tj. za zvolený časový krok $\Delta\tau$, známe-li teploty tělesa $T^{(k+1)}$ na začátku tohoto kroku. Explicitní tvar umožňuje snadnější programování použité

numerické metody na počítači než např. tvar implicitní. Implicitní formule se získá náhradou derivace teploty podle času zpětnou diferencí $[(T^{(k)} - T^{(k-1)})/\Delta\tau]$. Diferenční rovnici je třeba současně řešit ve všech uzlech zvolené výpočtové sítě, protože neznámou teplotu $T^{(k+1)}$ nelze vypočítat přímo z jediné rovnice. Proto se jeví vhodnější metoda explicitní, i když má proti metodě implicitní nevýhodu v tom, že na volbě délky časového kroku $\Delta\tau$ závisí stabilita řešení. Velkou výhodou implicitních metod je totiž právě stabilita řešení pro libovolně dlouhý časový krok, který se při jejich použití volí jen s ohledem na chybu časové diskretizace úměrnou $\Delta\tau$.

Při řešení teplotního pole soustavy odlitek-forma-(jádro)-okolí je nutností matematicky modelovat fázovou přeměnu taveniny v tuhou fázi. Změna fáze je doprovázena skokovou změnou parametrů λ, c, ρ_v .

Převedení diferenciální rovnice (1) do diferenciálního tvaru je komplikováno právě touto skokovou změnou parametrů a nutností modelovat vývin latentního tepla při přechodu fáze. [5]

3.1 Diferenční tvar Fourierovy rovnice



Obr. 3: Bilanční schéma uzlového bodu sítě [5]

Diferenční tvar rovnice (1) pro explicitní vyjádření neznámé teploty $T_{i,j_0}^{(k+1)}$ v kartézských souřadnicích odvodíme z tepelné bilance obecného uzlového bodu (i, j_0) sítě. Bilanční schéma tohoto uzlu je na Obr. 3. Objem prvku V_{i,j_0} reprezentovaný uzlem (i, j_0) , je ohraničen plochami $S_v, S_s, S_h, S_d, S_p, S_l$, (m^2). Teplo akumulované v objemu za časový krok $\Delta\tau$ je dáno rovnici (4).

$$Q_{ak} = Q_v + Q_s + Q_h + Q_d + Q_p + Q_l \quad [J] \quad (4)$$

Tepelné toky Q_V až Q_L jsou kolmé na ohraničující plochy S_V až S_L se stejným indexem. Akumulované teplo změny v průběhu časového kroku $\Delta\tau$ teploty uzlu na $T_{i,j_0}^{(k+1)}$. Zápis rovnice (5) je připraven pro náhradu derivace teploty podle času dopřednou diferencí:

$$Q_{ak} = \rho c V_{i,j_0} (T_{i,j_0}^{(k+1)} - T_{i,j_0}^{(k)}) \quad [\text{J}] \quad (5)$$

Teplo přitékající do uzlu (i, j_0) za krok $\Delta\tau$ (v rozmezí časů $k+1$ a k), např. přední plochou S_P elementu, lze psát rovnicí (6).

$$Q_P = \frac{\lambda}{x_P} S_P (T_{i_1,j_0}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) \Delta\tau \quad [\text{J}] \quad (6)$$

nebo např. vrchní plochou S_V rovnice (7)

$$Q_V = \frac{\lambda}{z_V} S_V (T_{i,j_3}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) \Delta\tau \quad [\text{J}] \quad (7)$$

Analogicky je možno vyjádřit i ostatní tepla přitékající do uzlu za krok $\Delta\tau$ z rovnice (4). Pro zjednodušení zápisu se zavedou do rovnice (8) výrazy

$$\begin{aligned} C_{i,j_0} &= \rho_v c V_{i,j_0}, \quad V = \frac{\lambda}{z_V} S_V, \quad S = \frac{\lambda}{z_S} S_S, \\ H &= \frac{\lambda}{y_H} S_H, \quad D = \frac{\lambda}{y_D} S_D, \quad P = \frac{\lambda}{x_P} S_P, \quad L = \frac{\lambda}{x_L} S_L, \end{aligned} \quad (8)$$

které charakterizují fyzikální parametry λ, ρ_v, c a geometrické rozdělení sítě. Spojením rovnic (4) a (5) se dostane rovnice (9)

$$\begin{aligned} C_{i,j_0} \frac{T_{i,j_0}^{(k+1)} - T_{i,j_0}^{(k)}}{\Delta\tau} &= V(T_{i,j_3}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + S(T_{i,j_4}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + H(T_{i,j_1}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + \\ &+ D(T_{i,j_2}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + P(T_{i_1,j_0}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + L(T_{i_2,j_0}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) \end{aligned} \quad (9)$$

Neznámá teplota uzlu (i, j_0) v čase $k+1$ je dána explicitním vztahem

$$\begin{aligned} T_{i,j_0}^{(k+1)} &= \frac{\Delta\tau}{C_{i,j_0}} \left[V(T_{i,j_3}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) + S(T_{i,j_4}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) + H(T_{i,j_1}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) + \right. \\ &+ D(T_{i,j_2}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) + P(T_{i_1,j_0}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) + L(T_{i_2,j_0}^{(k)} - T_{i,j_0}^{(k)}) \left. \right] + T_{i,j_0}^{(k)} \quad (10) \\ & \quad [\text{°C}] \end{aligned}$$

Podle rovnice (10) se provede výpočet neznámé teploty uzlu sítě, který je ve formě nebo jádře. Pro objemové elementy odliktu zapíšeme rovnici (5) ve tvaru rovnice (11).

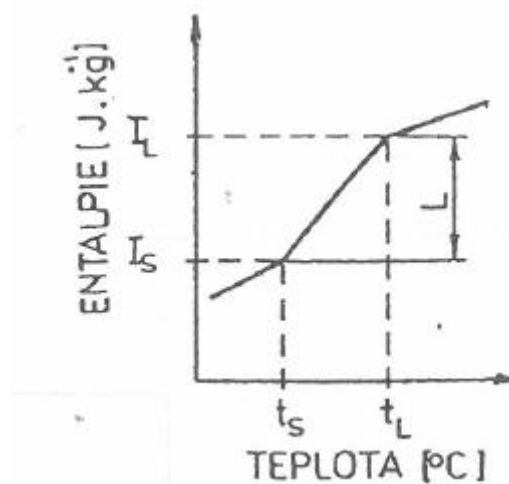
$$Q_{ak} = q V_{i,j_0} (I_{i,j_0}^{(k+1)} - I_{i,j_0}^{(k)}) \quad [\text{J}] \quad (11)$$

kde je zaveden rozdíl entalpií (tepelného obsahu), tedy úbytek entalpie uzlu (i, j_0) odlitku za časový krok $\Delta\tau$. Explicitní vyjádření neznámé entalpie uzlu (i, j_0) v čase $k+1$ rovnicí (12) v odlitku se získá spojením rovnic (4) a (11).

$$I_{i,j_0}^{(k+1)} = \frac{\frac{\Delta\tau}{\rho v V_{i,j_0}}}{V(T_{i,j_3}^k - T_{i,j_0}^{(k)})} + S(T_{i,j_4}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + H(T_{i,j_1}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + D(T_{i,j_2}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + P(T_{i_1,j_0}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + L(T_{i_2,j_0}^k - T_{i,j_0}^{(k)}) + I_{i,j_0}^{(k)} \quad (12)$$

$[J \cdot kg^{-1}]$

Neznámá teplota uzlu odlitku se stanoví z funkční závislosti $T = f(I)$. Tuto závislost, která se pro daný materiál taveniny stanoví, lze schematicky naznačit na Obr. 4. V rozmezí teplot likvidu (T_L) a solidu (T_S) je úbytek entalpie roven skupenskému teplu fázové přeměny L .



Obr. 4: Obecná závislost entalpie tuhnoucí taveniny na teplotě. [5]

Při výpočtu teplot eventuálně entalpií ve formě (jádre) a odlitku z rovnice (10) a (12) je třeba volit časový krok $\Delta\tau$ tak, aby byla dodržena, jak již bylo řečeno, podmínka stability řešení. [5]

3.2 Okrajové podmínky řešení

Při sestavování bilančních rovnic na okrajích sítě je nutno přihlížet k okrajovým podmínkám. Na okrajích sítě ve styku s okolím (prostor slévárny, hutě, laboratoře) se uvažuje většinou okrajová podmínka třetího druhu. Při sestavování bilančních rovnic na vnitřním povrchu (na styku forma-odlitek nebo jádro-odlitek) se případně aplikují okrajové podmínky všech čtyř druhů. Závisí to na tom, jakým způsobem se charakterizuje přestup tepla na rozhraní odlitek-forma, eventuálně odlitek-jádro.

Hlavní okrajové podmínky, kterým je nutno vyhovět při řešení Fourierovy rovnice, jsou totiž čtyř druhů:

- 1. druhu – je zadána teplota na povrchu tělesa (index p) v závislosti na čase

$$T_p = f_1(x_p, y_p, z_p, \tau) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (13)$$

- 2. druhu - je zadán tepelný gradient na povrchu tělesa, kde na levé straně je zápis parciální derivace teploty podle normály (n) k povrchu; výraz též charakterizuje tepelný tok.

$$\frac{\partial T_p}{\partial n} = f_2(x_p, y_p, z_p, \Delta\tau) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (14)$$

- 3. druhu – je zadána teplota okolí T_{ok} a součinitel přestupu tepla mezi tělesem a okolím

$$\alpha_{ok} - \frac{\partial T_p}{\partial n} = \alpha_{ok} \cdot (T_p - T_{ok}) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (15)$$

- 4. druhu - jsou zadány termodynamické vlastnosti a teplotní pole tělesa 2, které přijde v okamžiku $\tau = 0$ do dokonalého fyzikálního styku s povrchem řešeného tělesa 1

$$\lambda_1 = \frac{\partial T_{p1}}{\partial n} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_{p2}}{\partial n} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (16)$$

Není zde podán přehled všech numerických metod, kterými je možno nastíněný matematický model řešit. Simulace vývinu latentního tepla fázové přeměny zavedením entalpie není zatím zcela běžná. [5]

4. Komerční software

Komerčních softwarů je velké množství. Všechny jsou založeny na vlastním modelu tuhnutí. Začaly vznikat na začátku 90. let minulého století. Pomáhají lépe pochopit fyzikální, chemické a tepelné procesy, ke kterým dochází během lití, tuhnutí a chladnutí odlitků. Optimalizací procesu výroby odlitku se šetří materiál i peníze. Zlepšuje se jakost odlitků. [6]

4.1 Software NovaFlow&Solid

Pro lepší představu o umístění odlitku, vtokové soustavy a nálitků ve formě je vhodné provést simulaci tuhnutí samotného odlitku. Simulace ukáže problematická místa.

Zpracováním dat dílčích simulací lze navrhnout technologický postup bez vad. Až poté se spouští celková simulace plnění a tuhnutí, jejichž výsledky jsou zpracovány celkem rychle a přesně. Software umožňuje sledovat tepelné moduly v různých místech odlitku.

NovaFlow&Solid má omezené možnosti zadávání okrajových podmínek. Provedená srovnání simulací se třemi experimentálními odlevy do pískových forem prokázala odchylku výskytu vad v odlitku oproti simulaci ve 2 – 6% . [6]

4.2 Software Pal-Cast

je složitější než NovaFlow&Solid. Před zahájením simulace je třeba

- vytvořit spojitý 3D model odlitku v nějakém CAD systému
- vytvořit spojitý 3D model formy v nějakém CAD systému
- vygenerovat povrchovou síť FEM metodou konečných prvků
- načtení aktualizovaného odlitku do simulace pro vytvoření výpočtové sítě FDM
- přiřazení materiálů jednotlivým entitám
- nastavení okrajových podmínek
- spuštění a vyhodnocení simulace

Software má vysokou míru spolehlivosti. Porovnání simulací s experimenty prokázalo odchylku ve výskytu vad v rozmezí 1 – 3% . Program umožňuje vyhodnocovat průběh plnění, tuhnutí, ochlazování odlitku a předpovědi staženin. Umí řešit i vnitřní pnutí a výpočty struktur materiálu. Nevýhoda spočívá v nutnosti zadání mnoha parametrů a tím zvýšení časové a hardwarové náročnosti. [6]

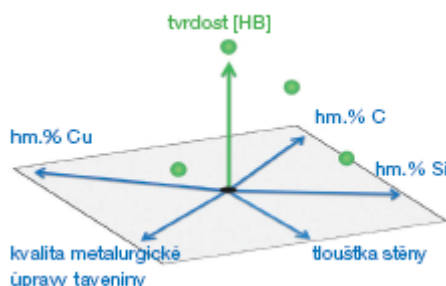
4.3 Software Magma a virtuální testovací pole, propojení mezi klasickou simulací a optimalizací

Software Magma slouží k optimalizaci výrobních procesů odlitků. Virtuální testovací pole tvoří 3 části:

- optimalizační proměnné, počáteční procesní nebo geometrické parametry, které se mohou měnit během optimalizace
- výstupní hodnoty kritérií vypočtených v 3D simulaci
- cíle numerické optimalizace

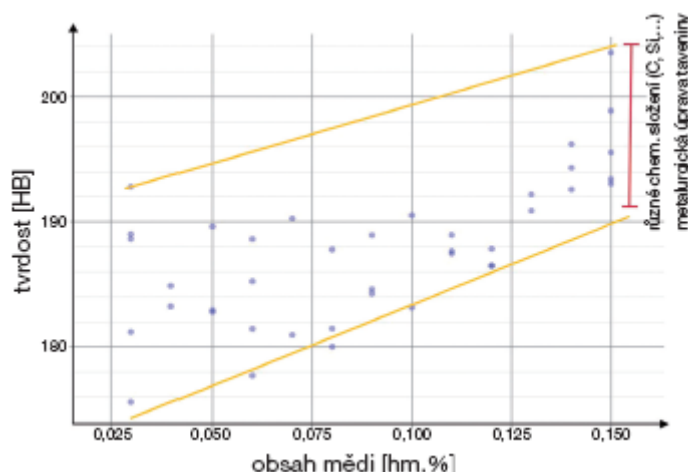
Numerická optimalizace

Verze 0 je základní verze s nastavenými parametry. Optimalizačními proměnnými je myšlen počet, velikost a umístění nálitků i s chemickým složením slitiny. Výsledky simulací jsou použity pro posouzení kvality navrhovaných technologických postupů, plnění formy, tuhnutí odlitku, vnitřních vad, mikrostruktury a mechanických vlastností.



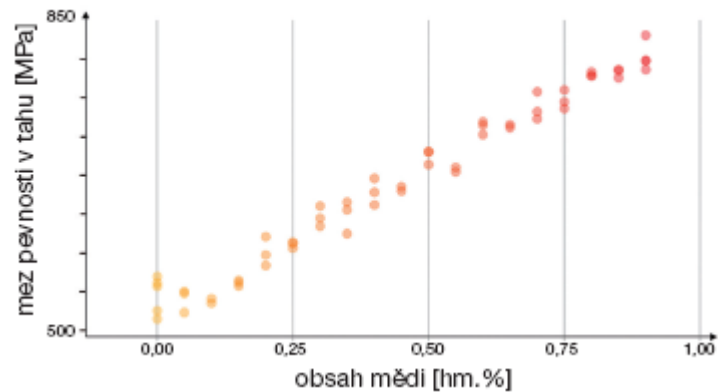
Obr. 5: Schéma jednoduchého virtuálního testovacího pole [8]

Obr. 5 zobrazuje litinový odlitek, u kterého je zkoumán vliv chemického složení na tvrdost. Na modrých osách jsou znázorněny měnitelné parametry. Orientace os ukazuje různé vlivy těchto parametrů. Jednotlivé simulační výsledky jsou zaznamenány zelenou tečkou. Hodnoty z virtuálního pole lze vzájemně porovnat v diagramech vlivů.



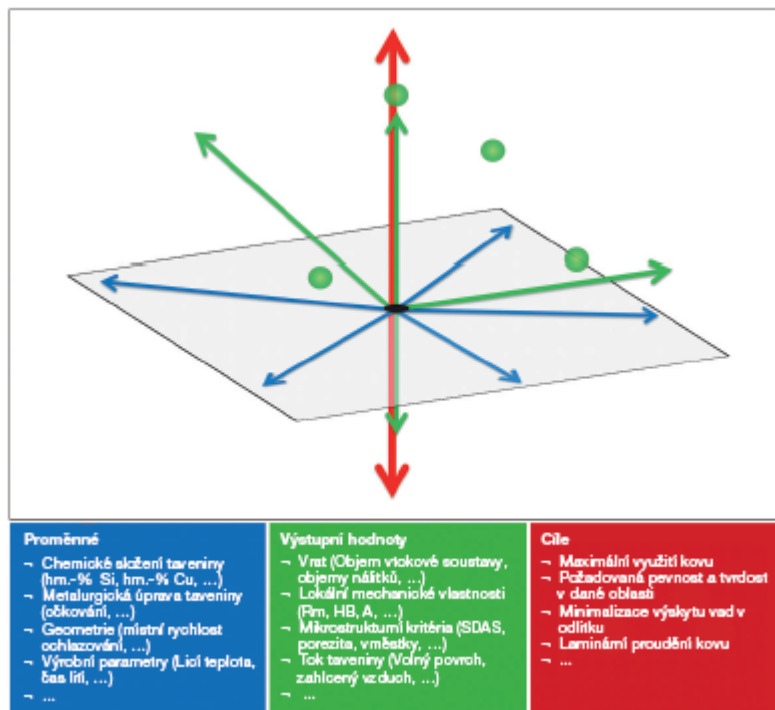
Obr. 6: Diagram vlivu mědi na tvrdost jako funkce v softwaru Magma v litinovém odlitku [8]

Obr. 6 znázorňuje vliv mědi na tvrdost. Každý zelený bod reprezentuje simulovanou variantu. Z Obr. 6 vyplývá, že s rostoucím procentem mědi stoupá tvrdost litiny, protože měď příznivě ovlivňuje tvorbu perlitu.



Obr. 7: Diagram vlivu mědi na mez pevnosti jako funkce v softwaru Magma v litinovém odlitku [8]

Obr. 7 ukazuje vliv obsahu mědi na mez pevnosti v tahu. Program Magma vyhodnocuje prvky, které mají na tvrdost největší vliv, a při optimalizaci do procesu nemusí vstupovat všechny počáteční parametry.



Obr. 8: Propojení testovacího pole s různými optimalizačními cíli [8]

Obr. 8 zachycuje různé optimalizační cíle. Některé optimalizace mohou být ve vzájemném rozporu. Program hledá automaticky nejlepší řešení. [8]

Zvyšování jakosti ocelových ingotů za pomoci numerických simulací v programu Magma

Ocelové ingoty jsou charakterizovány progresivním tuhnutím, což je tuhnutí od stěn kokily k tepelné ose. Pro zdravý odlitek je třeba brát v úvahu faktory ovlivňující tuhnutí: chemické složení, přehřátí taveniny, čas lití, rozměry kokily a prostup tepla kokilou.

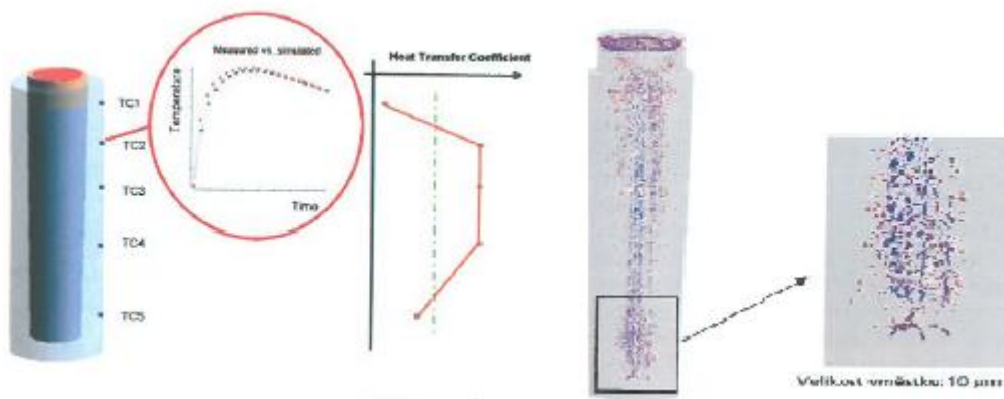
Na základě výsledků simulace lze stanovit výslednou jakost ingotů a předpovědět kde vzniknou staženiny a vměstky.

Ingot se vyznačuje velkou výškou a malou šířkou. Koeficient přestupu tepla mezi ingotem a kokilou se uvažuje konstantní po celé výšce. Čím více specifických podmínek tuhnutí se do simulace podaří zahrnout, tím přesnější výsledky software nabídne. Při optimálním návrhu procesu dojde k usměrněnému tuhnutí. Přenos tepla se řídí základními mechanismy. Ke zpomalení procesu tuhnutí se hlavová část vyplní izolací a hladina zasype izolačním zásypem. S pomocí simulace lze analyzovat všechny aspekty výroby ingotu.

Vizualizace toku taveniny během plnění ukáže rozložení teplotního pole, lze tak předpovědět tvorbu staženin a prasklin v patní části ingotu a předejít vzniku teplotních uzlů daleko od dosazovacích zón a tím i pnutí v ingotu.

Přenos tepla, izolace a tvar hlavy spolu se zásypem hladiny taveniny mají velký vliv na tuhnutí. Tvar hlavy je ovlivněn poměrem výšky k šířce. Přenos tepla mezi odlitkem a kokilou, vzhledem k velké tepelné vodivosti, nečiní problémy, jelikož kokila dobře odvádí teplo. Přestup tepla mezi kokilou a okolím je dán koeficientem přestupu tepla α_{ok} , který ovlivňuje množství odvedeného tepla na stykových plochách.

Koeficient přestupu tepla α_{ok} je neměřitelná, dopočítávaná veličina. Při inverzním modelování přestupů tepla se provede měření ohřevu kokily. Termočlánky změří reálné teplotní pole po odlití ingotu. Naměřené hodnoty se pak zanesou do simulace. Jen tak lze věrohodně předpovědět rozložení vnitřních vad (Obr. 9). [9]

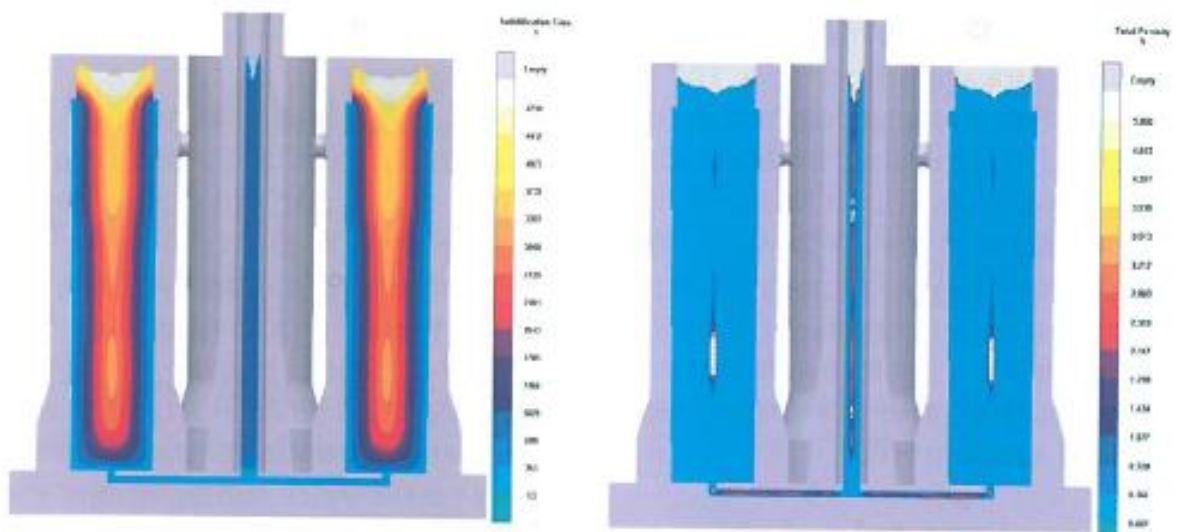


Obr. 9: Odchyly mezi naměřenými simulovanými teplotními křivkami byly inverzním modelováním minimalizovány pro všech pět termočlánků po celé výšce ingotu. Oranžová křivka v pravé části obrázku zachycuje výškově závislé koeficienty přestupu tepla, s nimiž bylo dosaženo nejlepšího překrytí teplotních křivek. Standardně se uvažuje, že koeficient přestupu tepla je konstantní po výšce ingotu zobrazen zelenou křivkou. [9]

Minimalizují se odchyly mezi měřením a simulací (Obr. 10).



Obr. 10: Schéma inverzního modelování koeficientů přestupu tepla mezi ingoty a kokilou. S programem pro automatickou optimalizaci slévárenských procesů mohou být minimalizovány odchylky mezi simulací získanými a skutečnými teplotními křivkami na vnějším povrchu kokily. [9]



Obr. 11: Výsledky simulace tuhnutí s použitím koeficientů přestupu tepla, které byly získány inverzním modelováním. Levý obrázek zachycuje lokální časy tuhnutí uvnitř ocelového ingotu. V pravé části obrázku jsou patrné oblasti, které budou tuhnout pomaleji než okolí a dojde zde k zaškrcení zbytkové taveniny, což vede k výskytu staženin. [9]

Obr. 11 ukazuje na zbylou tuhnoucí oblast u paty ingotu. Oblast těsně pod hlavou je ztuhlá a neumožňuje dosazení do patní části. V této oblasti vzniknou vady.

Simulace umožňuje sledovat pohyb taveniny a vměstků vlivem konvekce. Vměstky se koncentrují v oblasti tepelných uzlů. [9]

5. Usměrněné tuhnutí

Simulace teplotního pole odlitku má zajistit usměrněné tuhnutí. V průběhu tuhnutí odlitku dochází ke změnám teplotního gradientu. Postupující tavenina se ochlazuje plynule směrem od nejvzdálenějšího konce odlitku ke vtokové soustavě nebo nejbližšímu nálitku. K dosažení usměrněného tuhnutí musí být teplotní gradient vždy kladný. Bezprostředně po ukončení lití se porovná teplota v nejvzdálenějším konci formy a u vtoku. Získá se představa o počátečním teplotním gradientu v odlitku. Záporný teplotní gradient způsobuje staženiny a řediny.

Na teplotní pole odlitku má vliv velikost odlitku, tloušťka jeho stěn a rozložení tepelných uzlů. [3]

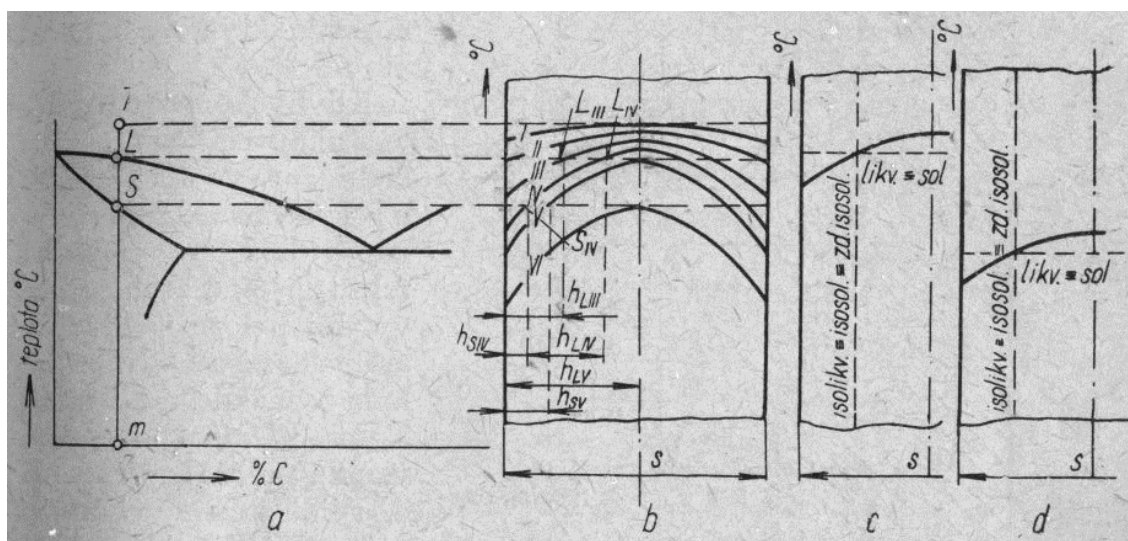
5.1 Teplotní gradient

Při počátečním kladném teplotním gradientu nemusí ještě dojít k usměrněnému tuhnutí. Vlivem chlazení stěn odlitku o různých tloušťkách může být teplotní pole rozloženo nerovnoměrně. Dochází k situacím, kdy zesílená stěna chladne pomaleji než okolí a neumožní dosazení dalšího materiálu. Vznikají podtlakové staženiny.

Po zchlazení odlitku se mohou objevovat deformace vlivem prnutí, které vzniká velkým teplotním gradientem při pomalém lití a deformuje odlitek. V extrémním případě může roztrhnout povrch odlitku. Malý teplotní gradient je způsoben velkými licími rychlostmi a tlaky. Při využití podnátkové vložky se trhлина vytvoří v místě kontaktu nálitku s odlitkem, kde ničemu nevádí. Tavenina tuhne ve všech částech odlitku více méně stejně, což má za následek minimální deformace, ale velké nebezpečí vzniku záporného tepelného gradientu se všemi jeho důsledky. Kolik se v odlitku vyskytuje tepelných uzlů, tolik by měl mít odlitek nálitků, pokud tepelný uzel nebyl eliminován jiným zásahem např. chlazením. [3]

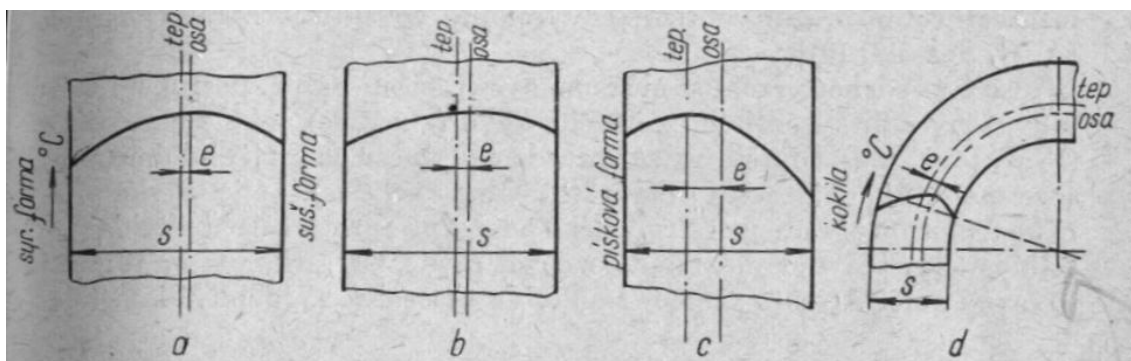
Příčný teplotní gradient

Interval tuhnutí ve stěně je určen chováním slitiny. Na Obr. 12a je slitina s intervalem tuhnutí L, S. Na Obr. 12b je naznačen řez stěnou.



Obr. 12: Charakteristika tuhnutí stěn odlitku a) rovnovážný diagram b) slitina s intervalem tuhnutí, c) čistý kov, d) eutektická slitina [3]

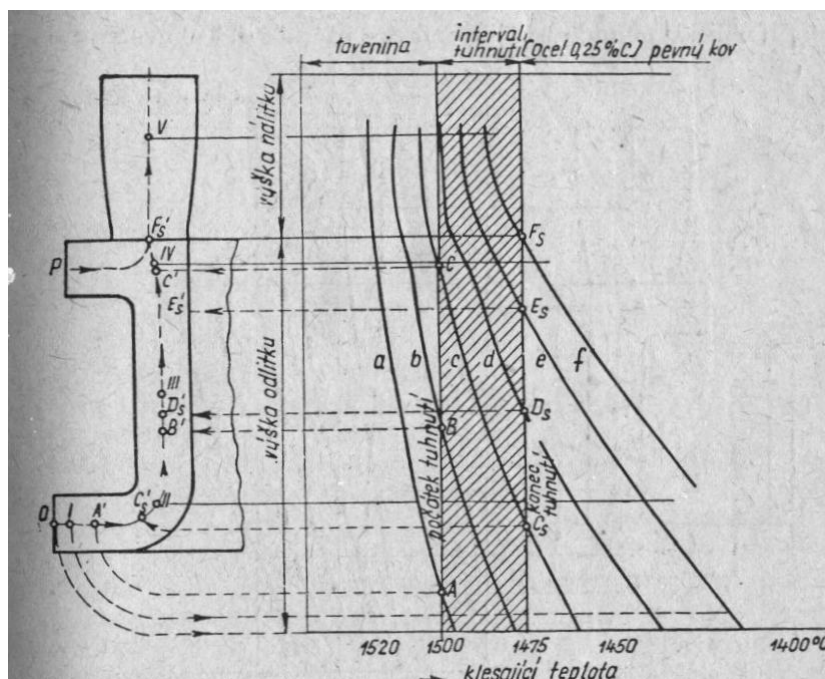
Po odlití je dáno rozdělení teplot ve stěně odlitku křivkou I. Křivka II začíná na hranici likvidu, kde začíná tuhnutí. Zbytek křivky je nad likvidem, kde se nachází tavenina. Křivka III probíhá oblastí mezi solidem a likvidem, kde se nachází tavenina s tuhneoucími krystaly. Část křivky vybíhá nad likvidus, tam kde je tavenina. Křivka IV se vyskytuje ve třech hladinách se ztuhými kraji pod čarou solidu. Tuhneoucí krystaly a tavenina se nachází v oblasti mezi solidem a likvidem a na křivce likvidu se nachází tavenina. Mezi solidem a likvidem probíhá pásmo taveniny (Obr. 12c a 12d) ohraničené isosolidou (ta spojuje místa, konců tuhnutí) a isolikvidou (spojující místa začátků tuhnutí). Odlitek chladne od stěny směrem k tepelné ose, ideálně ve středu odlitku. Tepelná osa mění svoji polohu, protože chladnutí z obou směrů nemusí probíhat stejně. (Obr. 13). [3]



Obr. 13: Poloha tepelné osy stěny odlitku a) různé formovací materiály po obou stranách, b) různá tloušťka téhož materiálu po obou stranách, c) kombinace písková forma - kokila, d) vliv zakřivení stěny. [3]

Podélný teplotní gradient

Podélný teplotní gradient vyjadřuje okamžité teploty kovu podél tepelné osy.

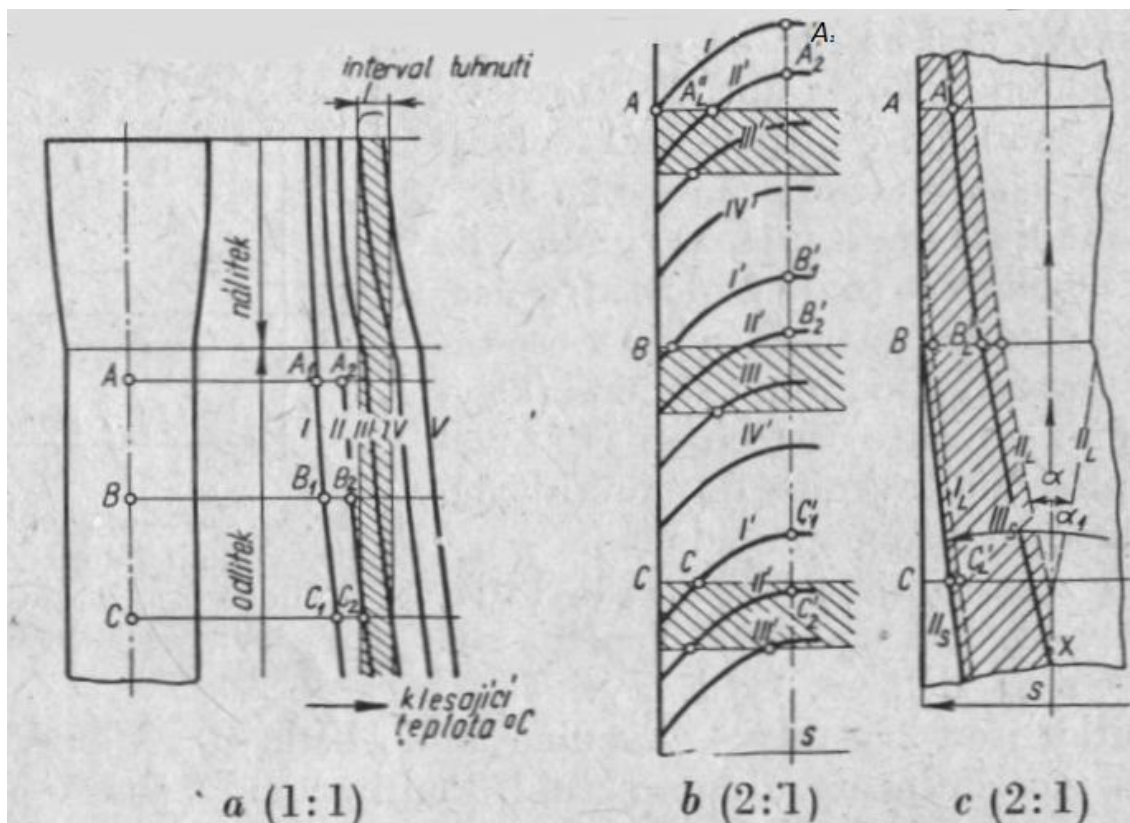


Obr. 14: Křivky podélného teplotního gradientu při lití vrchem [3]

Obr. 14 znázorňuje jednoduchý odlitek s intervalem tuhnutí, kde kov vtéká do formy vrchem a do nálitku spodem. Po skončení lití je gradient dán křivkou a . V čase se křivka gradientu posouvá směrem k fázi solidu. Bod B je přenesen na teplotní osu odlitku. Pod vzniklým bodem B' se nachází tavenina ve fázi tuhnutí. Se zvětšující se tloušťkou odlitku se prodlužuje čas tuhnutí. Bod C se nachází na isolikvidě a vše nad bodem C' je tavenina, bod C_s se nachází na isosolidě a vše pod bodem C'_s je ztuhlý kov. To pokračuje až do bodu F'_s , kde je odlitek zcela ztuhlý a náliček je ve fázi tuhnutí. [3]

Kombinace příčného a podélného teplotního gradientu

Pásmo tuhnutí je závislé na kombinaci obou teplotních gradientů. Poloha pásma tuhnutí má velký vliv na správné náliťkování a tuhnutí odlitku. Na diagramu uvedeném na Obr. 15a vlevo je část stěny odlitku s naznačenými třemi příčnými řezy A, B a C . Dále vpravo jsou znázorněna jednotlivá stádia podélného teplotního gradientu s přihlédnutím k intervalu tuhnutí. Na Obr. 15b jsou vyznačeny příčné teplotní gradienty v průřezích A, B a C rovněž s přihlédnutím k intervalu tuhnutí. Příslušné křivky příčného teplotního gradientu jsou zakresleny navzájem rovnoběžně ($I' \parallel I'' \parallel I', II' \parallel II'' \parallel II'$ a pod.), protože je předpokládán týž příčný teplotní gradient během tuhnutí ve všech třech uvažovaných průřezích.



Obr. 15: Kombinace podélného a příčného a podélného gradientu při usměrněném tuhnutí a) podélný teplotní gradient, b) příčný teplotní gradient, c) poloha pásma tuhnutí v průřezu odlitku [3]

Na Obr. 15c v příslušných průřezech jsou pak zaneseny příslušné body likvidu a solidu zjištěné z Obr. 15b. Spojením příslušných bodů likvidu v průřezech A, B, C se získají isolikvidy (čárkované), spojnice bodů solidus dávají isosolidy (plné).

Levá základní část Obr. 15 je obdobou Obr. 14. Křivky podélného teplotního gradientu platí pro tepelnou osu, proto teploty zjištěné jejich protnutím s příslušnými průřezy A, B, C se přenesou na Obr. 15b na tepelnou osu. Tak si vzájemně odpovídá poloha bodů A_1, B_1, C_1 , apod. (co do teplot) v části a jejich polohou v části diagramu b , protože tyto body v části Obr. 15b jsou vrcholy křivek příčného teplotního gradientu. Křivky příčného teplotního gradientu jsou pak zakreslovány schematicky a jejich průsečíky s likvidem a solidem jsou přenášeny na Obr. 15c, který je kreslen v témž měřítku.

Z Obr. 15c je patrné, že pásmo tuhnutí postupuje od povrchu směrem ke středu odlitku, nikoliv rovnoběžně s povrchem, nýbrž skloněno k povrchu v určitém úhlu. To je způsobeno tím, že v dolních částech odlitku má slitina nižší teplotu než nahoře. Isolikvidy i isosolidy postupující z obou stran se setkávají okamžitě vždy jen v jednom bodě ležícím na tepelné ose a směrem vzhůru o tohoto bodu se rozbíhají. Isolikvidy svírají úhel α , isosolidy α_1 . Z Obr. 15c je také patrné jak se rozšiřuje pásmo tuhnutí směrem k tepelné ose stěny odlitku.

S postupem pásma tuhnutí směrem k tepelné ose postupuje jejich vzájemná průsečnice směrem k nálitku. Tento směr posunu průsečnice je vyznačen šipkami na tepelné ose a je příznačný pro usměrněné tuhnutí. Pod bodem x ve stadiu III na tepelné ose je veškerá slitina ztuhlá, nad tímto bodem je určitá zásoba taveniny mezi krystaly (připomínající houby nasáklé vodou), která může ještě zaplnit právě vznikající mikrostaženiny v tepelné ose odlitku, takže odlitek při tomto způsobu tuhnutí bude vnitřně zdravější než při jiném mechanismu tuhnutí.

Usměrněné tuhnutí v kombinaci s účelným nálitkováním je tedy jediné správnou cestou k získání vnitřně zdravých odlitků.[3]

5.2 Tepelný uzel

Jeho okolí se dělí na oblasti, které mají svůj vlastní náliček k doplnění zmenšeného objemu. Oblast se chová jako by byla samostatným odlitkem. Usměrněné tuhnutí se vyznačuje otvíráním pásma tuhnutí směrem k nálitku. Tepelné uzly, jsou části odlitku, které chladnou a tuhnou pomaleji než zbytek odlitku. V tomto místě se soustřeďuje tavenina. Ocitne-li se tepelný uzel v cestě usměrněnému tuhnutí, je usměrnění ztraceno. Objem jednotlivých oblastí je určující pro velikost nálitku. Správné rozložení nálitků má vliv na úsporu kovů a energie.

Chlazení tepelného uzlu

Další možností, jak snížit materiálové a energetické nároky, je systém chlazení, hojně využívaný u kovových forem. Chlazení eliminuje vznik tepelného uzlu a tím odpadá potřeba nálitku. Rozdělené oblasti se sloučí. Sloučené oblasti mají větší objem, proto je potřeba dimenzovat náliček na nové parametry k zajištění usměrněného tuhnutí. Chlazení řeší problém spojení čtyř stěn do tzv. uzlu X. Metoda má i svá úskalí spojená s nedochlazením nebo přechlazením teplotního uzlu. [3]

6. Nálitkování

Nálitky jsou nezbytnou součástí soustavy. Slouží k dosazování dostatečného množství taveniny do tuhacího odlitku, odstraňují objemové staženiny odlitku a zabraňují vzniku ředin. Stěny nálitku odvedou asi 40% tepla a neošetřenou hladinou se ztratí asi 60%. Dokonalým izolačním ošetřením a správným rozložením nálitků, dle termické analýzy, je využito až 60% objemu k dosazení taveniny do odlitku. Dobře navržené nálitky dokážou dodávat tekutý kov tuhacímu odlitku a zabránit vzniku staženin a mikrostaženin. Ke správné funkci je třeba dostatečný objem a modul. Modul je poměr mezi povrchem a objemem odlitku. Nálitky tuhnou až jako poslední a jsou co možná nejmenší. Soustřeďují se v nich nečistoty vyplavované z tekutého kovu a tvoří se v nich staženiny.

Dosedací plocha je místo, kde se náliček spojuje s odlitkem. Čím větší je tato plocha, tím jsou vyšší náklady na čištění povrchu při dokončování. Tento problém odstranila až podnáliťková vložka.

6.1 Přirozené nálitky

jsou historicky nejstarší způsob nálitkování. Skládají se ze stejného materiálu, jako zbytek formy. Přirozený náliček vlivem tepelných ztrát využívá malou část svého objemu k dosazování kovu. Velký objem nálitku zajišťuje tepelnou izolaci dosazovaného kovu.

6.2 Mini nálitky

zvyšují celkovou účinnost dosazování tekutého kovu při snížení velikosti náliťkových systémů. Úspora materiálu je patrna na krychli o hmotnosti 28,7kg (Tab. 1):

Tab. 1: Rozdíly v dosazovací schopnosti a velikosti kontaktní plochy u různých typů náliťků.

	Přirozený náliček	Exotermický uzavřený nástavec	Mini náliček
Hmotnost nálitku [kg]	23	8,4	1,3
Dosedací plocha [cm ²]	153,8	73,5	19,6

- mini náliček obsahuje přísady, jako jsou křemičité písky, které zpomalují ztrátu tepla a zároveň exotermické přísady tuto ztrátu nahrazují
- mini nálitky s pružinovými trny vytvářejí vrstvu písku mezi náličkem a odlitkem, která chrání odlitek proti exotermickým látkám
- mini nálitky s kovovou vložkou, po které se náliček pohybuje směrem dolů a zhutňuje formovací směs pod sebou. Mezi náličkem a odlitkem vzniká velmi malý krček s výborným povrchem po odlomení. Mini náliček je usazen na trnu. [7]

6.3 Dělení náliťků do skupin

Nálitky se dělí podle umístění polohy vtoku či tepelného uzlu, dle působícího tlaku na hladinu kovu, tvaru nálitku a způsobu zaizolování nálitku.

Dle umístění ve formě:

- otevřené nálitky ústí na povrch formy
- uzavřené nálitky jsou uvnitř dutiny odlitku, většinou v jádře. Vlivem silně zahřátého jádra dochází ke zpoždění tuhnutí v nálitku, proto dosedací plocha nálitek-odlitek nemusí vyhovovat požadavku vepsaných koulí.

Dle polohy vtokové soustavy:

- v přilehlých nálitcích bývá nejteplejší kov a jsou neúčinnější díky své blízkosti k vtokové soustavě
- v polopřilehlých nálitcích již protekla tavenina částí dutiny formy a do nálitku vstupuje chladnější, účinnost je nižší
- odlehlé nálitky mají nejnižší účinnost. Tavenina prošla celou dutinou formy a do nálitku vstupuje již silně ochlazená

Vůči tepelnému uzlu či odlitku:

- přímé nálitky jsou orientované na tepelný uzel shora
- boční nálitky jsou orientovány na tepelný uzel z boku

Dle tlaku na hladinu kovu:

- podtlakové nálitky jsou velice málo účinné a je zde velké nebezpečí vzniku štíhlé staženiny. Nálitky jsou uzavřené, nepůsobí zde atmosférický tlak, pouze metalostatický.
- atmosférické nálitky jsou otevřené. Při dosazování taveniny působí atmosférický tlak zároveň s metalostatickým.
- přetlakové nálitky jsou uzavřené, zavádí se do nich kapsle s plynotvornou náplní, která po nalití taveniny a vzniku tuhé kůry vytvoří plyn, který může působit tlakem p až 0,3MPa na hladinu kovu a dosazuje taveninu. Tlak plynu se obtížně reguluje.

Tepelně ošetřené:

- nálitky zasypané jsou tepelně izolační zasypy, jako je písek a popílek
- nálitky zasypané exotermicky jsou zasypy obsahující kysličníky železa a hliníkový prášek. Chemickou reakcí mezi těmito látkami vzniká teplo.
- nálitky izolované jsou obloženy izolační hmotou buď zčásti, nebo celé
- exotermické nálitky zpomalují tuhnutí obkladem z exotermické směsi

Dle průřezu:

- kruhové nálitky
- oválné nálitky
- eliptické nálitky
- ledvinovité nálitky [1]

7. Tepelné izolace a zásypy

Izolace a zásypy zpomalují tuhnutí kovů v nálitcích zmírněním tepelných ztrát. Jejich nejdůležitější parametry jsou hustota ρ , měrné teplo c a tepelná vodivost λ . Od toho se odvíjí skupenské teplo tání kovu, což je množství tepla spotřebovaného na roztavení 1 kg.

Izolace a zásypy se dělí na izolační a exotermické. V případě exotermických izolací a zásypů jde o dodání tepla nálitku uvolněného chemickou reakcí, např. mezi oxidy železa s hliníkem.

Exotermické nálitky mají lepší využitelnost tekutého kovu než izolační nálitky. Exotermická reakce hliníku a fluoridových sloučenin má za následek degradaci kuličkového grafitu na lupínkový grafit. Od využívání fluoridových reaktivních solí se upouští.

7.1 Tepelné izolace

Tepelné izolace jsou materiály, které snižují přenos tepla a tím značně prodlužují tuhnutí slitiny. O velikosti jejich součinitele tepelné vodivosti rozhoduje měrná hmotnost v závislosti na tvaru, velikosti, strukture a pórovitosti izolačního materiálu. Využívají se v metalurgii železných a neželezných kovů, např. k izolaci nálitků, vtoků forem, tavících kelímků, míchačů a ohříváčů, vnějších i vnitřních obkladů všech druhů pecí, vtokových otvorů, vypustí pecí, licích žlabů, vtoků, pánví, nosičů filtrů a jako vysokoteplotní těsnění pro všechna použití.

Nálitkové nástavce izolují největší plochu nálitku. Mohou být jak izolační, tak i exotermické. Díky izolačním nástavcům nemusí být nálitka tak velký nebo mít větší modul. Tím se snižují náklady na výrobu a čištění odlitku.

Žáruvzdorný papír

Izolační materiál o síle 0,5-10 mm je dodáván dle výkresové dokumentace zákazníka ve formě výřezu nebo přířezů přesných rozměrů. Maximální tepelné zatížení je 1100-1300°C v závislosti na síle a technologii zpracování. Skladování je nutné v suchém prostředí.

Flesibrex (Obr. 16, Tab. 2)

je vyrobený z keramických hlinitokřemičitých vláken Sibal s organickými pojivy.

$$T_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}, \rho_v = 210 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \sigma_{t,\min} = 100\text{kPa}. [10]$$

Tab. 2: Závislost λ na T .

T [°C]	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ pro sílu 5mm	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ pro sílu 8mm
400	0,106	0,106
600	0,148	0,148
1000	0,276	0,324



Obr. 16: Žáruvzdorný papír Flesibrex [10]

Fibratec NF 1260

je vyrobený na bázi keramického vlákna s vysokou tepelnou stabilitou, velmi nízkou tepelnou vodivostí a odolností proti většině chemikálií $T_{\max} = 1260^{\circ}\text{C}$,

$$\rho_v = 185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. [11]$$

Luiang LYTX 236-B (Obr. 17)

je vyrobený z keramických vláken s nízkou tepelnou vodivostí, odolný proti většině chemikálií, s velmi dobrou odolností proti teplotním šokům a pevností v tahu.

$$T_{\max} = 1260^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_v = 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \sigma_{t\min} \geq 30\text{kPa} [12]$$



Obr. 17: Žáruvzdorný papír Luiang [12]

Superwool Plus (Obr. 18, Tab. 3)

je vyrobený z vysokoteplotní izolační vlny a bio vláken s organickými pojivy. Vyznačuje se vysokou pružností, odolností proti teplotním šokům, velmi nízkou tepelnou vodivostí a je odolný proti zachytávání částic hliníku.

$$T_{\max} = 1200^{\circ}\text{C}, \rho_v = 190 - 210 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \sigma_{t\min} > 500\text{kPa} [12]$$

Tab. 3: Závislost λ na T .

T [°C]	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$
400	0,07
600	0,11
1000	0,23



Obr. 18: Žáruvzdorný papír Superwool Plus [12]

Superwool HT (Obr. 19, Tab. 4)

je vyrobený z vysokoteplotních izolačních bio vláken s organickými pojivy. Vyznačuje se vysokou pružností, odolností proti prudkým změnám teploty, velmi nízkou teplotní vodivostí, nereaguje s tekutým hliníkem a je hladký po obou stranách.

$$T_{\max} = 1300^{\circ}\text{C}, \rho_v = 210 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \sigma_{t,\min} > 450\text{kPa} [12]$$

Tab. 4: Závislost λ na T .

T [°C]	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$
400	0,07
600	0,10
1000	0,19
1200	0,25



Obr. 19: Žáruvzdorný papír Superwool HT [12]

Vata z keramických vláken (Obr. 20, Tab. 5)

Vyrábí se odstředivým rotačním rozvlákněním nebo rozfoukáním taveniny oxidu hlinitého a oxidu křemičitého. Různými poměry vstupních surovin a přidavkem dalších komponentů je dosahováno odlišných vlastností. Využívá se na výrobu izolačních tvarovek, oprav mezer a spár, na realizaci torkretačních nástřiků pecí. Vyznačuje se nízkou tepelnou vodivostí, vysokou tepelnou stabilitou, je bez organických pojiv, odolává většině chemikálii a tepelným šokům. [12]

Tab. 5: Závislost c na T .

	$T_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	$c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
LYTX-311	1260	1,13
LYTX-511	1430	1,13
LYTX-611	1600	1,16



Obr. 20: Vata z keramických vláken [12]

Žárovzdorné rohože

Izolační materiál se vyrábí o síle 6-50 mm, šířce 610 mm a délce dle zvolené síly. Maximální tepelné zatížení je 1200-1600°C v závislosti na síle a technologii zpracování.

Rohože z keramického vlákna Fibratex HPS, HP, HTZ, Supermag (Obr. 21, Tab. 6)

Pro zlepšení mechanických vlastností jsou oboustranně prošity keramickým vláknem. Odolávají většině chemikálií, teplotním šokům a neobsahují pojiva. Izolují pece, poklopy a kokily. [11]

Tab. 6: Závislost ρ_v a c na m .

m [kg] role	ρ_v $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	c $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$
10,7	96	1,13
14,3	128	1,13
17,9	160	1,13



Obr. 21: Žárovzdorné rohože Fibratex HPS, HP, HTZ, Supermag [11]

Fibratex HPS (Tab. 7 – 9)

$$T_{\max} = 1260^{\circ}C, \rho_v = 64 \frac{kg}{m^3}, \sigma_t = 55MPa$$

Tab. 7: Závislost λ na T .

T [°C]	260	316	538	816	982	1093
λ $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	0,10	0,12	0,19	0,33	0,43	0,50

Fibratec HP

$$T_{\max} = 1315^{\circ}\text{C}, \rho_v = 96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \sigma_t = 69\text{MPa}$$

Tab. 8: Závislost λ na T .

$T[^{\circ}\text{C}]$	260	316	538	816	982	1093
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,07	0,09	0,15	0,25	0,34	0,41

Fibratec HTZ

$$T_{\max} = 1425^{\circ}\text{C}, \rho_v = 128 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \sigma_t = 83\text{MPa}$$

Tab. 9: Závislost λ na T .

$T[^{\circ}\text{C}]$	260	316	538	816	982	1093
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,06	0,07	0,12	0,20	0,26	0,30

Fibratec Supermag (Tab. 10 - 11)

$$T_{\max} = 1260^{\circ}\text{C},$$

Tab. 10: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$T[^{\circ}\text{C}]$	260	538	816	982	1093
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,07	0,14	0,23	0,29	0,33

Tab. 11: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 128 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$T[^{\circ}\text{C}]$	260	538	816	982	1093
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,06	0,12	0,19	0,24	0,28

Rohože z keramického vlákna FLX 1600 (Tab. 12 – 13)

Prošivací rohože z ohnivzdorného keramického vlákna, které jsou využívány k tepelně izolačním vyzdívám pecí $T_{\max} = 1600^{\circ}\text{C}$, $c = 1,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ [11]

Tab. 12: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 100 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	800	1200
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,18	0,36

Tab. 13: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 130 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	800	1200
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,2	0,42

Rohože z keramických vláken LYTX-212, 312, 512 Obr. 22, (Tab. 14 – 16)

vyznačují se nízkou tepelnou vodivostí, velmi dobrou pevností v tahu, odolností proti většině chemikálií a teplotním šokům. Využití nacházejí při izolaci pecí, vík pánví a jako vysokoteplotní těsnění. Dodávají se v objemové hmotnosti $96 \frac{kg}{m^3}$ a $128 \frac{kg}{m^3}$. [12]

**Obr. 22: Žárovzdorné rohože Lytx-212,312,512 [12]**

LYTX-212 $T_{max} = 1260^{\circ}C$, $\rho_v = 128 \frac{kg}{m^3}$, $\sigma_t \geq 40kPa$

Tab. 14: Závislost λ na T .

$T [^{\circ}C]$	200	400	600
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,045-0,060	0,085-0,110	0,152-0,200

LYTX-312 $T_{max} = 1260^{\circ}C$, $\rho_v = 128 \frac{kg}{m^3}$, $\sigma_t \geq 40kPa$

Tab. 15: Závislost λ na T .

$T [^{\circ}C]$	200	400	600
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,052-0,07	0,095-0,120	0,164-0,210

LYTX-512 $T_{\max} = 1425^{\circ}\text{C}$, $\rho_v = 128 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\sigma_t \geq 40 \text{kPa}$

Tab. 16: Závislost λ na T .

$T [^{\circ}\text{C}]$	200	400	600
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,052-0,07	0,095-0,120	0,164-0,210

Rohože z keramických vláken Cerablanket $T_{\max} = 1260^{\circ}\text{C}$ **Cerachem Blanket**

$T_{\max} = 1425^{\circ}\text{C}$ (Obr. 23, Tab. 17 – 20)

mají výborné izolační vlastnosti, tepelnou stabilitu. obře odolávají re-krytalizaci a jsou prošívané dlouhými nelámovými vlákny bez pojiv, odolné proti roztržení, teplotním šokům a většině chemikálií až na kyselinu fluorovodíkovou, fosforečnou a silné alkálie. Uplatňují se k izolaci kotlů, tavicích, vypalovacích a sušících pecí, ke zpracování kovů a jako vysokoteplotní izolace. [12]



Obr. 23: Žárovzdorné rohože Cerablanket [12]

Tab. 17: Závislost σ_t na ρ_v .

$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	64	96	128	160
$\sigma_t [\text{kPa}]$	30	70	90	110

Tab. 18: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 64 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$T [^{\circ}\text{C}]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,07	0,12	0,20	0,30	0,43

Tab. 19: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$T [^{\circ}\text{C}]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,06	0,11	0,16	0,23	0,32

Tab. 20: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 128 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,06	0,10	0,15	0,20	0,37

Rohož z bio vláken Superwool Plus (Obr. 24, Tab. 21 – 24)

je vyrobena z dlouhých vysokoteplotních izolačních vlněných vláken s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi bez obsahu pojiva a lubrikantu. Je pružná, odolná proti natržení a imunní proti teplotním šokům. $T_{max} = 1200^{\circ}C$, $\sigma_t = 75kPa$. [12]

**Obr. 24: Žáruvzdorné rohože Superwool Plus [12]****Tab. 21: Závislost λ na T .**

$$\rho_v = 64 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,06	0,11	0,18	0,29	0,42

Tab. 22: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 80 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,06	0,09	0,15	0,24	0,36

Tab. 23: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 96 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,05	0,09	0,14	0,21	0,29

Tab. 24: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 128 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,05	0,08	0,12	0,18	0,25

Rohož z bio vláken Superwool HT (Obr. 25, Tab. 25 – 27)

je vyrobena z dlouhých vysokoteplotních izolačních vlněných vláken s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi bez obsahu pojiva a lubrikantu. Jsou pružné, odolné proti natržení a imunní proti teplotním šokům. Nereagují s cihlami obsahujícími Al_2O_3 . $T_{max} = 1300^{\circ}C$. [12]

**Obr. 25: Žárovzdorné rohože Superwool HT [12]****Tab. 25: Závislost σ_t na ρ_v .**

$\rho_v \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\sigma_t [kPa]$
64	30
96	50
128	75
160	95

Tab. 26: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 96 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000	1200
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,05	0,10	0,19	0,32	0,48	0,69

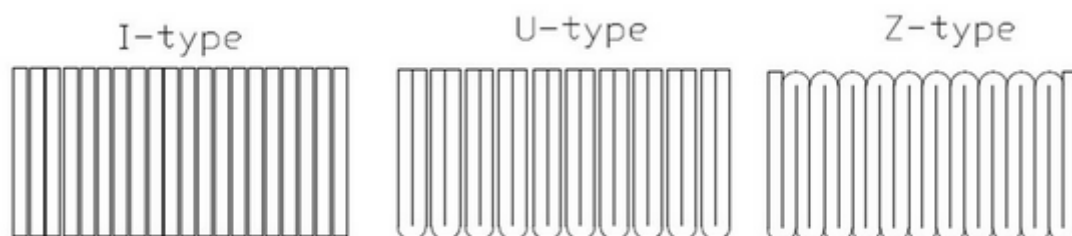
Tab. 27: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 128 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	200	400	600	800	1000	1200
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,04	0,08	0,14	0,23	0,34	0,48

Moduly Kerablok (Obr. 26, Tab. 29 – 31)

vyznačují se vysokou hustotou $\rho_v = 160 \frac{kg}{m^3}$ až $240 \frac{kg}{m^3}$. Díky vysoké objemové hustotě mají vynikajících technických a fyzikálních parametrů. Vyrábějí se lisováním z rohoží prošíváných keramickým vláknem ve třech variantách I, U, Z, dle výkresové dokumentace zákazníka. Jednotlivé typy se od sebe liší uložením vlákna. Bloky jsou k sobě kotveny vnitřně nebo z venku. Mezi jednotlivé bloky se vkládá vložka. [11]



Obr. 26: Moduly Kerablok [11]

Maximální teplota je ovlivněna vlastnostmi použité rohože z keramických vláken. Kombinovaný modulární blok je vyráběn z rohoží HTL $T_{max} = 1600^{\circ}C$ a HTZ $T_{max} = 1425^{\circ}C$.

Tab. 28: Přehled maximálních teplot modulů Kerablok

Lisovaná rohož	HPS	HP	HTZ	Supermag	Combi
$T_{max} [^{\circ}C]$	1260	1315	1425	1260	1600

Tab. 29: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 160 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	530	810	1090
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,14	0,250	0,350

Tab. 30: Závislost λ na T .

$$\rho_v = 200 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	530	810	1090
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,120	0,220	0,300

Tab. 31 Závislost λ na T .

$$\rho_v = 220 \frac{kg}{m^3}$$

$T [^{\circ}C]$	530	810	1090
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,100	0,190	0,280

Vykazují stabilitu proti teplotním šokům, mají nízkou tepelnou vodivost $c = 1,13 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, odolnost proti většině chemikálií a nulový obsah pojiv. Vyžívají se pro izolaci pecí a kokil. [11]

Žáruvzdorné a izolační tvarovky

Keramické tvarovky jsou vyráběny z hlinitokřemičitých vláken s organickými i neorganickými přísadami. Metodou rozvláknění taveniny rotačním způsobem lze vyrábět tvary dle výkresové dokumentace zákazníka. Uplatňují se především na izolaci náliček, kokil, vtokové soustavy a pecních hledítek. Maximální tepelné zatížení je $T = 1250 - 1650^{\circ}C$. [11]

Tvaroform (Obr. 27)

využívá se jako tepelná izolace do $T_{max} = 1200^{\circ}C$. Dobře snáší tepelné šoky a oxidační prostředí. Vyznačuje se vysokou tepelnou reflexí, malou tepelnou vodivostí a kapacitou. Lze vyrábět pouze otevřené tvarovky. Využívá se ve slévárství na izolaci tavicích kelímků, vtokových otvorů, výpustí pecí, náliček a nosičů filtrů. Měrná hmotnost se přibližně pohybuje okolo $\rho_v = 300 \frac{kg}{m^3}$. Kyseliny fosforečná, fluorovodíková, louhy a alkalické taveniny snižují tepelnou odolnost. [10]



Obr. 27: Žáruvzdorné a izolační tvarovky Tvaroform [10]

Tvarovky na bázi keramických vláken (Tab. 32 - 33)

vyznačují se nízkou tepelnou vodivostí, vysokou pevností a malou hmotností. [11]

Tab. 32: Závislost ρ_v na T .

	LD-2300	LD-2600	LD-2800	LD-3000	MD-2300	MD-2600	MD-3000
$T_{max} [^{\circ}C]$	1260	1425	1538	1650	1260	1425	1650
$\rho_v \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	256-320	256-320	256-320	256-320	336-400	336-400	336-400

Tab. 33: Závislost λ na T .

$T[^\circ\text{C}]$		LD-2300	LD-2600	LD-2800	LD-3000	MD-2300	MD-2600	MD-3000
316	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09
538	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,12
760	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,12	0,12	0,12	0,14	0,13	0,13	0,15
1094	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,17	0,17	0,17	0,20	0,17	0,17	0,21

Mikro-porézní materiály

Zachovávají si malou tepelnou vodivost v širokém rozsahu teplot. Skládají se z navzájem izolovaných nebo propojených pórů. Výjimečnost mikro-porézních materiálů spočívá ve vynikajících izolačních schopnostech při kryogenních teplotách. Účinně snižují hmotnost a objem izolačních vrstev tepelné izolace. $T_{\text{max}} = 950 - 1100^\circ\text{C}$

WDS High (Obr. 28)

je mikro-porézní tepelně izolační materiál s vynikajícími izolačními schopnostmi. Využívá se k izolaci pecí při zpracování hliníku. Je citlivý na jakékoli kapaliny, které poškodí jeho mikro-porézní strukturu. Pokud se nenamočí, je jeho životnost takřka neomezená, proto se balí do Aluminiových folií. Dobře snáší tepelné šoky.

$$T_{\text{max}} = 1050^\circ\text{C}, \quad \rho_v = 250 - 310 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \sigma_t = 1,3 \text{MPa}, \quad \lambda = 0,021 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{při } 200^\circ\text{C},$$

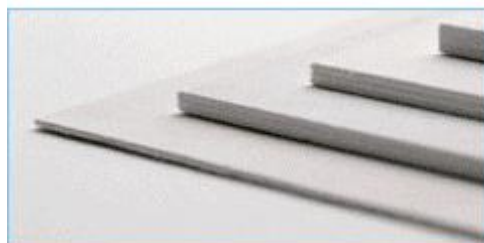
$$c = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{do } 400^\circ\text{C}. \quad [12]$$

**Obr. 28: Mikro-porézní materiály WDS High [12]**

WDS Ultra (Obr. 29, Tab. 34)

využívá se jako izolace zušlechťovacích a udržovacích pecí pro hliník a jako izolace průmyslových pecí. Je citlivý na jakékoli kapaliny, které poškodí jeho mikro-porézní strukturu. Odolává teplotním šokům od vysokých po nízké teploty.

$$T_{\max} = 950^{\circ}\text{C}, \rho_v = 230 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \sigma_t = 0,16\text{MPa}, c = 0,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{ do } 800^{\circ}\text{C}.$$



Obr. 29: Mikro-porézní materiály WDS Ultra [12]

Tab. 34: Závislost λ na T .

$T[^{\circ}\text{C}]$	50	100	200	300	400	500	600	700	800
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,018	0,019	0,020	0,022	0,024	0,027	0,031	0,035	0,040

WDS Lambaflex Super (Obr. 30, Tab. 35)

využívá se jako vnější izolace v hutním průmyslu a slévárenství neželezných kovů. Má výborné izolační vlastnosti. Skládá se z anorganických silikátů. Je citlivý na jakékoli kapaliny, které poškodí jeho mikroporézní strukturu.

$$T_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}, \rho_v = 300 - 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \sigma_t = 1,45\text{MPa}, c = 0,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{ do } 800^{\circ}\text{C}. [12]$$

Tab. 35 Závislost λ na T .

$T[^{\circ}\text{C}]$	20	200	400	600	800
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,024	0,028	0,034	0,041	0,051



Obr. 30: Mikro-porézní materiály WDS Lambaflex Super [12]

WDS Lambaflex (Obr. 31, Tab. 36)

je využíván jako vnější tepelná izolace v hutním průmyslu a slévárenství neželezných kovů. Skládá se z anorganických silikátů. Má nízké hodnoty tepelné vodivosti. Je citlivý na jakékoli kapaliny, které poškodí jeho mikroporézní strukturu.

$$T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}, \rho_v = 300 - 430 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \sigma_t = 1,3\text{MPa}, c = 0,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{ do } 800^{\circ}\text{C}. [12]$$

Tab. 36 Závislost λ na T .

$T[^\circ\text{C}]$	20	200	400	600	800
$\lambda\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$	0,021	0,023	0,028	0,034	0,042

**Obr. 31:** Mikro-porézní materiály WDS Lambaflex[12]**WDS Flexipor (Obr. 32, Tab. 37)**

má výborné izolační vlastnosti, je vyroben bez mezer a spár což má za následek stabilní tepelné a izolační vlastnosti po celé ploše výrobku. Skládá se z anorganických silikátů. Využívá se ve slévárenském a hutním průmyslu neželezných kovů. Je citlivý na jakékoli kapaliny, které poškodí jeho mikroporézní struktury. $T_{\text{max}} = 1050^\circ\text{C}$,

$$\rho_v = 280 - 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \sigma_t = 1,3 \text{MPa}, \quad c = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \text{ do } 400^\circ\text{C}. [12]$$

**Obr. 32:** Mikro-porézní materiály WDS Flexipor [12]**Tab. 37 Závislost λ na T .**

$$\rho_v = 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$T[^\circ\text{C}]$	200
$\lambda\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$	0,024

Mikroporézní desky Keralight (Obr. 33, Tab. 38)

Vyrábí se z materiálů s nejnižší tepelnou vodivostí. Izolují zadní části pecí a odlévacích zařízení a kokil.

$$T_{\text{max}} = 980^\circ\text{C}, \quad \rho_v = 258 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. [11]$$

Tab. 38 Závislost λ na T .

$T [^{\circ}C]$	17	260	538	816
$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0,016	0,017	0,020	0,033

**Obr. 33: Mikro-porézní materiály Keralight [11]****Izolační desky**

obsahují žáruvzdorná keramická vlákna s anorganickými a organickými pojivy nebo mohou být vyrobeny z kalcium-silikátové směsi. Používají se převážně v aplikacích, kde je požadováno přesné opracování nebo nižší obsah izolace. Keramická vlákna o $T_{\max} = 1260 - 1650^{\circ}C$. Kalcium-silikátová vlákna o $T_{\max} = 1000 - 1100^{\circ}C$

Desky z keramického vlákna Fibratex (Tab. 39 – 42)

jsou vyrobeny z keramických vláken a organických i anorganických pojiv. Vyrábí se vakuovou technologií. Mají nízkou tepelnou vodivost. Jsou odolné proti teplotním šokům a většině chemikálií. Využívají se k izolaci pecí a metalurgických zařízení. [11]

Tab. 39: Závislost ρ_v na T

	LD-2300	LD-2600	LD-2800	LD-3000	MD-2300	MD-2600	MD-3000
$T_{\max} [^{\circ}C]$	1260	1425	1538	1650	1260	1425	1650
$\rho_v \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	256-320	256-320	256-320	256-320	336-400	336-400	336-400

Tab. 40: Závislost λ na T .

$t[^\circ\text{C}]$		LD-2300	LD-2600	LD-2800	LD-3000	MD-2300	MD-2600	MD-3000
316	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09
538	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,12
760	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,12	0,12	0,12	0,14	0,13	0,13	0,15
1094	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,17	0,17	0,17	0,20	0,17	0,17	0,21

Tab. 41 Závislost ρ_v na T

	HD-2300	HD-2600	HD-3000	Inorganic	LD	13mm MD
$T_{\text{max}} [^\circ\text{C}]$	1260	1425	1538	1650	1260	1425
$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	256-320	256-320	256-320	256-320	336-400	336-400

Tab. 42: Závislost λ na T .

$t[^\circ\text{C}]$		HD-2300	HD-2600	HD-3000	Inorganic	LD	13mm MD
316	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,13	0,13	0,13	0,07	0,07	0,09
538	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,15	0,15	0,15	0,09	0,09	0,10
760	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,17	0,17	0,17	0,12	0,12	0,13
1094	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,20	0,20	0,20	0,18	0,18	0,17

Kalcium-silikátové desky (Tab. 43 – 46)

Vápenosilikátové desky jsou výbornými izolanty, používají se jako vyzdívkové zadní části pecí. Uplatňují se v redukční atmosféře pro svoji odolnost proti oxidu uhelnatému a uhlovodíkům. [11,12]

Tab. 43: Závislost ρ_v na T

	Kerasil 1000	Kerasil 1100
$T_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	1000	1100
$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	230	270

Tab. 44 Závislost λ na T .

$t [^{\circ}\text{C}]$		Kerasil 1000	Kerasil 1100
200	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,078	0,080
400	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,100	0,102
600	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,122	0,124
800	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,144	0,146

Tab. 45: Závislost ρ_v , σ_t a c na T

	Super – Isol	Super - 1100E
$T_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	1100	1100
$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	225	245
$\sigma_t [MPa]$	1,3	1,3
$c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	0,84	0,84

Tab. 46 Závislost λ na T .

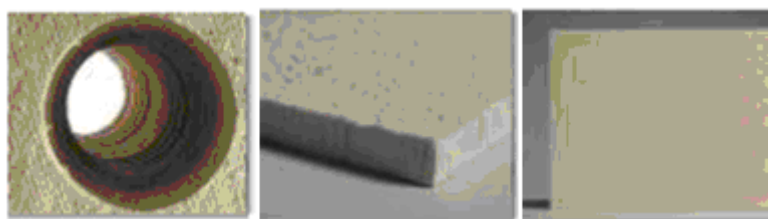
$t [^{\circ}\text{C}]$		Super - Isol	Super - 1100E
200	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,08	0,08
400	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,100	0,10
600	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,12	0,12
800	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,14	0,14

Žárovzdorné desky Tibrex (Obr. 34, Tab. 47)

vyrábějí se z hlinitokřemičitých žárovzdorných vláken a anorganických pojiv. Mají vysokou tepelnou odolnost. Využívají se na izolaci pecí, vík pánví, míchačů a ohřívačů v hutnictví a slévárenství. $T_{\max} = 1200^{\circ}\text{C}$, $\rho_v = 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\sigma_t = 150 \text{kPa}$. [10]

Tab. 47: Závislost λ na T .

$T [^{\circ}\text{C}]$	200	600	1000
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,12	0,17	0,34



Obr. 34: Žárovzdorné desky Tibrex [10]

Plastizol (Tab. 48 - 49)

je keramický izolační materiál vyznačující se vysokou pórovitostí, žárovzdorností, objemovou stabilitou a odolností proti teplotním šokům. [16]

Tab. 48: Závislost ρ_v a σ_t na T

	HB5	HB7	HB7/15	HB10/16
$T_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	1430	1430	1500	1600
$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	500	700	700	1000
$\sigma_t [\text{MPa}]$	0,8	2,0	2,5	5,0

Tab. 49: Závislost λ na T .

$T [^{\circ}\text{C}]$		HB5	HB7	HB7/15	HB10/16
100	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,16	0,26	0,25	0,53
300	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,19	0,29	0,31	0,56
500	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,23	0,32	0,36	0,60
700	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,28	0,35	0,39	0,60
1000	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,36	0,41	0,44	0,64

Žáruvzdorné cihly

S rostoucí teplotou se zvyšuje jejich pevnost. Jsou odolné proti tepelným šokům.

Vermikulitové izolační cihly (Tab. 50 – 51)

vyskytují se ve dvou provedeních, ty se liší objemovou hmotností. Využívají se jako zadní izolace termických zařízení. Jsou hojně zastoupeny v pracovní vrstvě. Mají vysokou odolnost proti přímému plameni a redukčním atmosférám. Jsou rezistentní proti oxidu uhelnatému a uhlovodíkům. $T_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$. [12]

Tab. 50: Závislost λ na T

$$\rho_v = 375 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, c = 85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \sigma_t = 1,3 \text{MPa}$$

$T [^{\circ}\text{C}]$	200	400	600	1000
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,12	0,15	0,16	0,19

Tab. 51: Závislost λ na T

$$\rho_v = 475 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, c = 81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \sigma_t = 2,5 \text{MPa}$$

$T [^{\circ}\text{C}]$	200	400	600	1000
$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,14	0,17	0,19	0,20

Molerové izolační cihly (Tab. 52 – 55)

mají vynikající izolační vlastnosti. $T_{\max} = 900 - 1000^{\circ}\text{C}$. Existují ve dvou provedeních, buď porézní nebo pevné.

Porézní mají $T_{\max} = 950^{\circ}\text{C}$ a využívají se pro nízko a středně zatížené nosné konstrukce, na vyzdívání pecí zpracovávajících železo a ocel. Vyznačují se nízkou akumulací tepla a malou tepelnou roztažností. [12]

Tab. 52: Závislost ρ_v , σ_t a c na T

	Hipor 450	Poros 500	Hiporos	Poros
$T_{\max} [^{\circ}\text{C}]$	950	950	900	950
$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	450	500	570	650
$\sigma_t [\text{MPa}]$	1,5	2,5	1,6	3,0
$c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	0,98	0,98	0,70	0,80

Tab. 53: Závislost λ na T

$T[^\circ\text{C}]$		Hipor 450	Poros 500	Hiporos	Poros
200	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,10	0,10	0,12	0,13
400	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,13	0,13	0,14	0,15
600	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,15	0,15	0,16	0,17
800	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,17	0,17	0,18	0,18

Molerové izolační cihly jsou pevné, hodí se pro $T_{\text{max}} = 1000^\circ\text{C}$. Využívají se pro nosné konstrukce zadních žáruvzdorných vyzdívek. Dobré izolační vlastnosti.

Tab. 54 Závislost ρ_v , σ_t a c na T

	Supra	M-Extra
$T_{\text{max}} [^\circ\text{C}]$	950	1000
$\rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	750	950
$\sigma_t [\text{MPa}]$	7,5	18
$c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	0,80	0,80

Tab. 55 Závislost λ na T

$T[^\circ\text{C}]$		Supra	M-Extra
200	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,15	0,22
400	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,17	0,24
600	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,19	0,25
800	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	0,21	0,26

7.2 Exotermické zásypy

Izolační a exotermické zásypy bývají v zrnitém nebo práškovém stavu. Podle potřeby bývají využívány jednotlivě nebo dohromady. Slouží pro zmírnění tepelných ztrát nebo dodání tepelné energie do nálitku z exotermické reakce podle chemického vzorce:



Využívají se ve slévárnách a ocelárnách jako krycí exotermický zásyp pro ošetření hladiny taveniny. Usměrnují tuhnutí kovu a zabraňují vzniku ředin a staženin. Přesné množství zásypu je rozprášeno na hladině nálitku. Velkou tepelnou účinnost zaručuje exotermická reakce, která při kontaktu s hladinou zvětší svůj objem a vytvoří krustu popela, sloužící jako izolační vrstva. Skladují se po dobu 6 měsíců v suchém prostředí. Při přepravě musí být chráněny proti navlhnutí.

Granex (Tab. 56)

uplatňuje se na všechny druhy ingotů a ocelí. Typy granexu se liší intenzitou exotermické reakce. Mají velký tepelný a izolační výkon, snižují dávku min. o 20 - 50% oproti klasickým exozásypům. Teplota zážehu je 600°C. [13]

Tab. 56: Doporučené dávkování Granexu.

Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Tloušťka zásypu [mm]
100	0,20	25-50
150	0,45	25-50
200	0,8	25-50
300	1,8	25-50
400	3,5	27-54

Ferro G (Tab. 57)

uplatňuje se k ošetření hladiny taveniny s lící teplotou při 1200°C. Teplota zážehu je 600°C. Ferro G má vysoké tepelné a izolační schopnosti, snižuje dávku zásypu min. o 50% oproti klasickým exozásypům. V průběhu hoření zásyp zvyšuje svůj objem o cca 100%. [14]

Tab. 57: Doporučené dávkování Ferro G

$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]
0,1	100	2,6	400	11	650
0,16	150	4	450	15	700
0,4	200	5	500	21	800
0,7	250	6,5	550	33	900
1,1	300	8,5	600	45	1000

Ferro G50 (Tab. 58)

uplatňuje se jako krycí zásyp hladiny taveniny, převážně z oceli. Aktivační teplota je 600°C. Objem se zvětší cca o 50%. Díky vynikajícím teplotním a izolačním výkonům je min. snížení dávky o 25% oproti klasickým exozásypům při střední produkci kouře. [14]

Tab. 58: Doporučené dávkování Ferro G50

$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]
0,2	100	4,9	400	22	650
0,3	150	7,5	450	35	700
0,75	200	9,5	500	45	800
1,3	250	12,5	550	70	900
2,1	300	17	600	100	1000

Ferro 25 (Tab. 59)

uplatňuje se jako krycí zásyp hladiny taveniny s licími teplotami nad 1200°C. Zásyp zvětší svůj objem cca o 100% v průběhu exotermické reakce. Více produkuje kouř. Vysoký tepelný a izolační výkon umožňuje snížení dávky min. o 50% oproti klasickým exozásypům.[14]

Tab. 59: Doporučené dávkování Ferro 25

$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]
0,1	100	2,6	400	11	650
0,16	150	4	450	15	700
0,4	200	5	500	21	800
0,7	250	6,5	550	33	900
1,1	300	8,5	600	45	1000

Ferro 40 Tab. 60

je krycí zásyp pro taveninu s licí teplotou nad 1200°C. Více produkuje kouř, vzniká pevná křusta, která dobře izoluje a při exotermické reakci má vysoký tepelný výkon.[14]

Tab. 60: Doporučené dávkování Ferro 40

$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]	$m[kg]$	Průměr nálitku [mm]
0,2	100	4,5	400
0,5	150	6	450
0,9	200	8	500
1,7	250	10	550
2,5	300	12	600

Luxotherm L9 LT

je silně exotermický zásyp vhodný pro všechny slitiny železných i neželezných kovů. Při hoření má nízkou produkci kouře a vytváří pevnou porézní křustu. Ta má velký tepelný a izolační výkon. Doba tuhnutí nálitku se zvětšuje o 50%. Po celé ploše nálitku je 20-30 mm silná vrstva zásypu. Je jemnozrný. [14]

Luxotherm L9

využívá se pro krycí zásyp na hladině taveniny lehkých neželezných kovů. Má nízký vývin kouře při prohořívání, vzniká pevná porézní křusta s velmi dobrým tepelným a izolačním výkonem. Zásyp je jemnozrnný, prodlužuje délku tuhnutí taveniny o 50%. Tloušťka zásypu je 20-30 mm po celé ploše nálitku. [14]

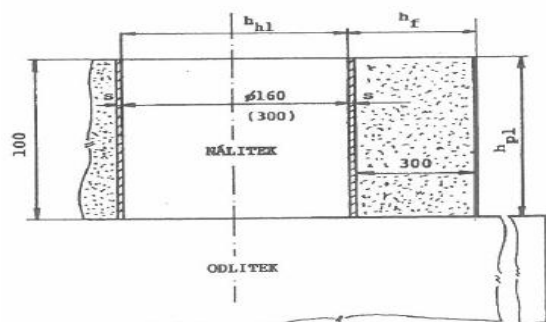
Luxotherm SO

využívá se pro ošetření nálitků se slitinami těžkých neželezných kovů. Jedná se o jemnozrnný krycí zásyp. Při malém vývinu kouře se vytváří pevná porézní křusta s velkým tepelným a izolačním účinkem. Nálitky v tekutém stavu vydrží cca o 50% déle. Tloušťka zásypu je 20-30 mm na ploše nálitku. [14]

8. Příklad využití numerického modelu k výběru izolace

8.1 Zadání, jeho rozbor a příprava řešení

Výpočtem teplotního pole je srovnán izolační účinek Plastizolu a Sibralu pro tuhnoucí nálitky $\varnothing 160$ a $\varnothing 300$ mm, výšky 100 mm, použitý pro obecný odlitek z materiálu ČSN, tř. 42, o teplotě lití 1550 °C. Nálitky byly zaformovány do válcové pískové formy. Tloušťka izolace nálitky byla uvažována v rozsahu 10 až 100 mm. Hladina taveniny v nálitce byla zasypána exotermickou směsí s vysokým izolačním účinkem. Schéma zadané soustavy je uvedeno na obr. 35.



Obr. 35: Schéma zaformování nálitky [12]

Z hladiny nálitků uvažujeme nulový odvod tepla (koeficient přestupu tepla $h_{hl} = 0$), ze spodní základny soustavy rovněž. Koeficient přestupu tepla z horní základny (h_f) a z pláště formy (h_{pl}) je funkcí povrchové teploty, stanovený běžným postupem s využitím teorie podobnosti.

Ke zjednodušení okrajové podmínky na hladině nálitky a na dně řešené soustavy se přikročilo na základě dřívějších analýz. Termodynamické vlastnosti materiálů těles soustavy byly použity v těchto hodnotách:

Odlévaný materiál:

hustota taveniny	$\rho_L = 6800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
hustota pevné fáze	$\rho_S = 7360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
měrná tepelná kapacita	$C_L = 628 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
	$C_S = 752 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
skupenské teplo	$L = 2,679 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
tepelná vodivost pro	$T > T_L \dots \dots \dots \lambda_L = 16,75 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
pro	$T < 800^\circ \dots \dots \dots \lambda_S = -0,0392 t + 56,48$
pro	$800^\circ \leq T \leq T_L \dots \lambda_S = 0,007325 t + 19,26$

Formovací materiál: $\rho_v = 1600$ $c = 1000$ $\lambda = 3,3$

Plastizol:

pro $T < 700^\circ$	$\rho_v \cdot c = 1,965 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
	$\lambda = 0,0002083 T + 0,13416$
pro $T \geq 700^\circ$	$\lambda = 0,0003 T + 0,07$

Sibral:

pro $T < 500^\circ$	$\rho_v \cdot c = 0,42 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$
	$\lambda = 0,00022 t + 0,04$
pro $500 \leq T < 900^\circ$	$\lambda = 0,0005 T - 0,14$
pro $T > 900^\circ$	

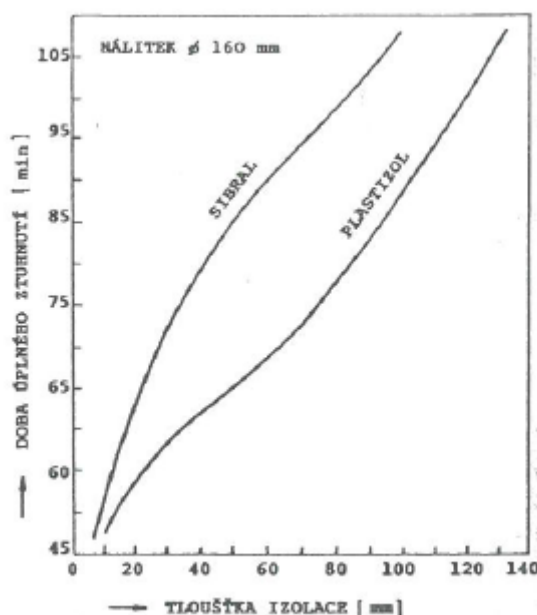
Soustava byla řešena v podélném osovém řezu. Jedná se o rotačně symetrickou úloh, proto je dostatečné řešit polovinu tohoto řezu, jehož jednou hranicí je formovací rám a druhou osa souměrnosti. Tato polovina řezu byla rozdělena na 15x10 výpočtových uzlů, z toho ve vlastním nálitku 60 uzlů. Při numerickém řešení (explicitní sítovou metodou viz kapitola 3.1) soustavy pro 90 rovnic výpočtové sítě v izolaci a formě a pro 60 rovnic v nálitku je stabilita řešení podmíněna geometrií sítě, termofyzikálními vlastnostmi jednotlivých, do soustavy vstupujících materiálů, hodnotami koeficientů přestupu tepla h a délkou zvoleného časového kroku. Bylo nalezeno kritérium k zajištění stability řešení pro okamžitou kombinaci vyjmenovaných parametrů, ze kterých se vypočte časový krok. V tomto případě byla stabilita numerického řešení zachována volbou kroku $\Delta\tau = 1s$. [12]

8.2 Výsledky řešení a jejich diskuze

Vliv materiálu a tloušťky izolace byl na tuhnutí nálitku hodnocen jeho celkovou dobou tuhnutí. Je to parametr, který je slévárenskými technologiemi vždy sledován jako první. Tzv modul tuhnutí odlitku nebo nálitku s celkovou dobou tuhnutí přímo souvisí.

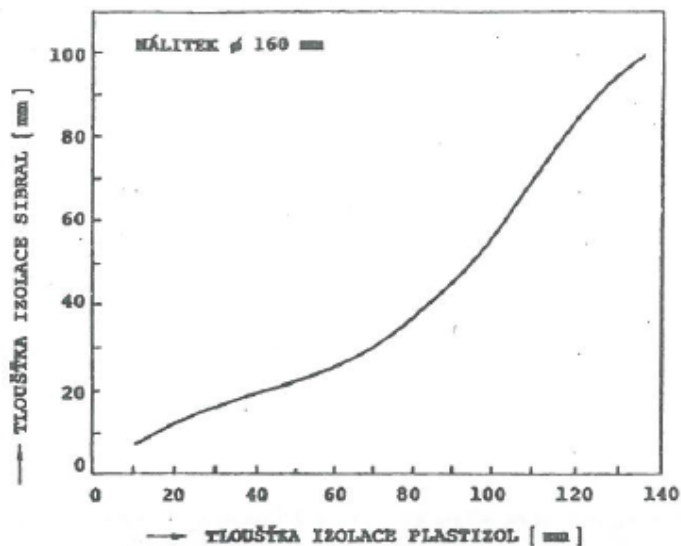
Náliek průměru 160 a výšky 100 mm

Závislost doby úplného ztuhnutí na tloušťce stěny nástavce a na druhu izolace je uveden na obr. 36.



Obr. 36: Závislost celkové doby tuhnutí na tloušťce izolace Plastizol a Sibral pro náliek průměru 160 a výšky 100 mm. [12]

Na osu úseček se nanáší tloušťka izolace v mm, na osu pořadnic celková doba tuhnutí v min. Je patrné že doba se u izolace Sibral prodlouží až o 30% (tloušťka 50 mm) ve srovnání s izolací Plastizol. Z těchto dvou křivek lze sestavit Tab. 61 a nakreslit Obr. 37, ze kterých je vidět, jaké tloušťce izolace Plastizol odpovídá ekvivalentním účinkem na celkovou dobu tuhnutí nálitku tloušťka izolace Sibral (A) a obráceně (B).



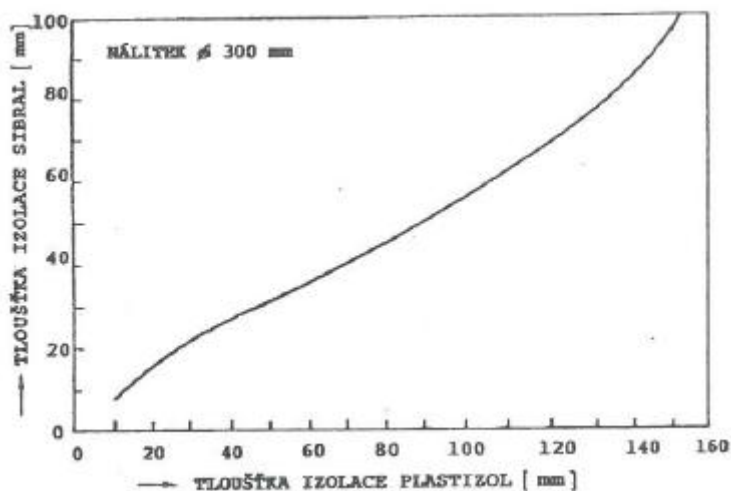
Obr. 37: Srovnání ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a Sibrál pro nálietek průměru 160 a výšky 100 mm [12]

Tab. 61: Srovnání účinku ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a Sibrál na celkovou dobu tuhnutí nálitku o průměru 160 mm.

Tloušťka izolace Plastizol [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Tloušťka izolace Sibrál [mm]	7	12	16	19	21,5	25	30,5	37,5	45	56
Tloušťka izolace Sibrál [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Tloušťka izolace Plastizol [mm]	16	44,5	68,5	83	94,5	103,5	110	117	125	136

Nálietek průměru 300 a výšky 100 mm

Zjištěná závislost celkové doby tuhnutí na tloušťce stěny tvarovky a na jejím materiálu dovoluje sestavit Tab. 62 a zakreslit obr. 38. [12]



Obr. 38: Srovnání ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a sibrál pro nálietek průměru 300 a výšky 100 mm [12]

Tab. 62: Srovnání účinku ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a Sibrál na celkovou dobu tuhnutí nálitku o průměru 300 mm.

Tloušťka izolace Plastizol [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Tloušťka izolace Sibrál [mm]	8	15	22	27	31	35,5	40	45	50	56
Tloušťka izolace Sibrál [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Tloušťka izolace Plastizol [mm]	14	26,5	47	70	90	108	122	131	145	153

8.3 Dílčí závěr

Byla provedena studie srovnání izolačních účinků Plastizolu a Sibrálu při izolaci nálitku. Byl zvolen náletek výšky 100 mm a průměru 160 a 300 mm. Sledoval se vliv izolace při zvětšování její tloušťky na celkovou dobu tuhnutí tohoto nálitku. Pro zjednodušení úvahy, že náletek bude dosazovat tuhoucímú obecnému odlitku, se na dolní hranici soustavy považuje axiální tepelný tok za nulový. Nestacionární vedení tepla v soustavě se uvažuje dvourozměrně vzhledem k válcovému osově symetrickému tvaru. Z téhož důvodu dostačuje řešit polovinu podélného osového řezu soustavou. Místem posledního tuhnutí je uzel ve středu dolní kruhové základny nálitku. Výpočet jednoznačně prokázal, že Sibrál má význačně lepší izolační vlastnosti než Plastizol a že tudíž lze z hlediska termokinetiky doporučit k praktickému použití. Nezávisle na této studii byla ověřena i jeho provozní způsobilost. I experimentálně bylo prokázáno, že izolační účinek Sibrálu je výrazně vyšší než Plastizolu. [12]

9. Závěr

Práce shrnuje druhy, principy a termofyzikální vlastnosti tepelných izolací a zásypů i jejich využití ve slévárenství s cílem zajistit usměrněné tuhnutí odlitků a tím jejich kvalitu. Je poukázáno, jaký význam má při návrhu nálitků pro slévárenského konstruktéra i technologa numerická simulace teplotního pole soustavy odlitek-forma (jádro)-okolí ke kontrole i predikci usměrněného tuhnutí za využití tepelných izolací a zásypů. Je popsán jeden z modelů nestacionárního teplotního pole zmíněné soustavy založený na explicitní numerické metodě řešení diferenční Fourierovy rovnice vedení tepla. Při této koncepci řešení je vedení tepla v soustavě považováno za rozhodující. Je zdůrazněno, že jde o výrazně nelineární úlohu, protože termodynamické vlastnosti všech součástí soustavy i okrajové podmínky se mění s teplotou. Jsou uvedeny některé komerční softwary využívající různé modely tuhnutí. V současnosti jsou k dispozici v několika desítkách.

Jako příklad konkrétní součinnosti matematického modelu a dvou tepelných izolací (obecně jich mohou být desítky) je uveden návrh izolovaného nálitku k dosažení usměrněného tuhnutí válcového odlitku. Výpočet i provedený kontrolní experiment jednoznačně prokázaly, že účinek izolace Sibrál je výrazně vyšší než izolace Plastizol.

10. Seznam použitých zdrojů

- [1] PLACHÝ, Jan, Milan NĚMEC a Bohumír BEDNÁŘ. 1986. Teorie slévání. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 108 s.
- [2] KAVIČKA, František. 1993. Termokinetika tuhnutí, ochlazování a ohřevu. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 153 s. ISBN 8021405317.
- [3] PŘIBYL, Josef. 1954. Tuhnutí a nálitkování odlitků. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 309 s.
- [4] Izolace nálitků ocelových odlitků - cesta k úspoře kovu a energií: [sborník přednášek] z aktivu ČV slévárenské společnosti ČSVTS, Staré Město pod Sněžníkem, říjen 1984. 1984. Praha: ČV slévárenské společ. ČSVTS, 52 s.
- [5] KAVIČKA, František a Jiří HLOUŠEK. 1995. Výpočtové srovnání izolačních účinků izolace Plastizol a Sibal. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, **1995** (č. 5): s. 322-325. ISSN 0037-6825.
- [6] HERMAN, Aleš a Karel LUŇÁČEK. 2002. Nejrychlejší (NOVACAST) a nejpresnější (PAM-CAST) počítačová simulace lití na světě. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, **2002** (č. 5-6): s. 209-212. ISSN 0037-6825.
- [7] FISHER, Stefan A., Udo SKERDI, Lee R. HORVATH a Zdeněk ŠMERDA. 2014. Moderní způsoby nálitkování – historie a současnost. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, **2014** (č. 9-10): s. 364-367. ISSN 0037-6825.
- [8] Virtuální testovací pole – propojení mezi klasickou simulací a optimalizací. 2014. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, **2014** (č. 11-12). ISSN 0037-6825.
- [9] Zvyšování jakosti ocelových ingotů za pomoci numerické simulace v SW MAGMA5. 2015. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, **2015** (č. 1-2). ISSN 0037-6825.
- [10] Filtrace, izolace - Hobra | Školník: Izolace [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.hobra.cz/cs/izolace-produkty/>
- [11] Keratech s.r.o.: Žáruvzdorné materiály [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.keratech.cz/zaruvzdorne-materialy/>
- [12] TACHTECH s.r.o.: Žáruvzdorné materiály [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.tachtech.cz/cz>
- [13] KOH-I-NOOR GRAFIT s.r.o.: Exotermické krycí zásypy [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.grafitnetolice.cz/granex_cz.php
- [14] H.A. Kovochem, spol. s.r.o.: Zásypy [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.hakovochem.cz/cs/produkty/zasypy.html>

11. Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin

Symbol	Význam	Jednotka
c	Měrné teplo	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$I_{i,j_0}^{(k)}$	Entalpie uzlu i, j_0 v čase k	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$I_{i,j_0}^{(k+1)}$	Entalpie uzlu i, j_0 v čase $k + 1$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
L	Skupenské teplo fázové přeměny	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
n	Normála k povrchu	$[-]$
q_{zdr}	Jednotkový tepelný tok s vnitřním zdrojem	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$
q	Jednotkový tepelný tok	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$
Q_{ak}	Teplo akumulované v elementárním objemovém elementu i, j_0 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
Q_D	Teplo přitekklé z uzlu i, j_2 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
Q_H	Teplo přitekklé z uzlu i, j_1 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
Q_L	Teplo přitekklé z uzlu i_2, j_0 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
Q_P	Teplo přitekklé z uzlu i_1, j_0 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
Q_V	Teplo přitekklé z uzlu i, j_3 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
Q_S	Teplo přitekklé z uzlu i, j_4 za čas $\Delta\tau$	$[\text{J}]$
S_D až S_S	Plochy ohraničující element i, j_0 (kolmé na toky Q_D až Q_S)	$[\text{m}^2]$
S	Plocha	$[\text{m}^2]$
$T_{i,j}^{(k)}$	Teplota uzlu i, j v čase k	$[\text{°C}]$
$T_{i,j}^{(k+1)}$	Teplota uzlu i, j v čase $k + 1$	$[\text{°C}]$
T_p	Teplota vnějšího povrchu	$[\text{°C}]$
T_{ok}	Teplota okolí	$[\text{°C}]$
$T_{Lití}$	Teplota lití	$[\text{°C}]$
T_L	Teplota likvidu	$[\text{°C}]$
T_S	Teplota solidu	$[\text{°C}]$
T	Teplota	$[\text{°C}]$
V_{i,j_0}	Objem uzlu i, j_0	$[\text{m}^3]$
x	Souřadnice ve směru osy x	$[-]$
x_L, x_p	Vzdálenost dvou sousedních uzlů ve směru osy x	$[\text{m}]$
y	Souřadnice ve směru osy y	$[-]$
y_H, y_D	Vzdálenost dvou sousedních uzlů ve směru osy y	$[\text{m}]$
z	Souřadnice ve směru osy z	$[-]$
z_S, z_V	Vzdálenost dvou sousedních uzlů ve směru osy z	$[\text{m}]$
α_{ok}	Součinitel přestupu tepla do okolí	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ	Tepelná vodivost	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ρ_v	Měrná hmotnost	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
τ	Čas	$[\text{s}]$
$\Delta\tau$	Délka časového kroku	$[\text{s}]$
m	Hmotnost	$[\text{kg}]$
σ_t	Pevnost v tlaku	$[\text{Pa}]$
p	Tlak	$[\text{Pa}]$

12. Seznam obrázků a grafů

Obr. 1: Tuhnutí polonekonečného odlitku podle Neumanna [2]	10
Obr. 2: Tuhnutí polonekonečného odlitku podle Schwarze [2]	11
Obr. 3: Bilanční schéma uzlového bodu sítě [5]	13
Obr. 4: Obecná závislost entalpie tuhnoucí taveniny na teplotě. [5]	15
Obr. 5: Schéma jednoduchého virtuálního testovacího pole [8]	18
Obr. 6: Diagram vlivu mědi na tvrdost jako funkce v softwaru Magma v litinovém odlitku [8]	18
Obr. 7: Diagram vlivu mědi na mez pevnosti jako funkce v softwaru Magma v litinovém odlitku [8]	19
Obr. 8: Propojení testovacího pole s různými optimalizačními cíli [8]	19
Obr. 9: Odchyly mezi naměřenými simulovanými teplotními křivkami byly inverzním modelováním minimalizovány pro všech pět termočlánků po celé výšce ingotu. Oranžová křivka v pravé části obrázku zachycuje výškově závislé koeficienty přestupu tepla, s nimiž bylo dosaženo nejlepšího překrytí teplotních křivek. Standardně se uvažuje, že koeficient přestupu tepla je konstantní po výšce ingotu zobrazen zelenou křivkou. [9]	20
Obr. 10: Schéma inverzního modelování koeficientů přestupu tepla mezi ingoty a kokilou. S programem pro automatickou optimalizaci slévárenských procesů mohou být minimalizovány odchyly mezi simulací získanými a skutečnými teplotními křivkami na vnějším povrchu kokily. [9]	21
Obr. 11: Výsledky simulace tuhnutí s použitím koeficientů přestupu tepla, které byly získány inverzním modelováním. Levý obrázek zachycuje lokální časy tuhnutí uvnitř ocelového ingotu. V pravé části obrázku jsou patrné oblasti, které budou tuhnout pomaleji než okolí a dojde zde k zaškrcení zbytkové taveniny, což vede k výskytu staženin. [9]	21
Obr. 12: Charakteristika tuhnutí stěn odlitku a) rovnovážný diagram b) slitina s intervalem tuhnutí, c) čistý kov, d) eutektická slitina [3]	22
Obr. 13: Poloha tepelné osy stěny odlitku a) různé formovací materiály po obou stranách, b) různá tloušťka téhož materiálu po obou stranách, c) kombinace písková forma - kokila, d) vliv zakřivení stěny. [3]	23
Obr. 14: Křivky podélného teplotního gradientu při liti vrchem [3]	23
Obr. 15: Kombinace podélného a příčného a podélného gradientu při usměrněném tuhnutí a) podélný teplotní gradient, b) příčný teplotní gradient, c) poloha pásma tuhnutí v průřezu odlitku [3]	24
Obr. 16: Žáruvzdorný papír Flesibrex [10]	29
Obr. 17: Žáruvzdorný papír Luiang [12]	29
Obr. 18: Žáruvzdorný papír Superwool Plus [12]	30
Obr. 19: Žáruvzdorný papír Superwool HT [12]	30
Obr. 20: Vata z keramických vláken [12]	31
Obr. 21: Žáruvzdorné rohože Fibratec HPS, HP, HTZ, Supermag [11]	31
Obr. 22: Žáruvzdorné rohože Lytx-212,312,512 [12]	33
Obr. 23: Žáruvzdorné rohože Cerablenket [12]	34
Obr. 24: Žáruvzdorné rohože Superwool Plus [12]	35
Obr. 25: Žáruvzdorné rohože Superwool HT [12]	36
Obr. 26: Moduly Kerablok [11]	37
Obr. 27: Žáruvzdorné a izolační tvarovky Tvaroform [10]	38
Obr. 28: Mikro-porézní materiály WDS High [12]	39

Obr. 29: Mikro-porézní materiály WDS Ultra [12]	40
Obr. 30: Mikro-porézní materiály WDS Lambaflex Super [12].....	40
Obr. 31: Mikro-porézní materiály WDS Lambaflex[12].....	41
Obr. 32: Mikro-porézní materiály WDS Flexipor [12].....	41
Obr. 33: Mikro-porézní materiály Keralight [11]	42
Obr. 34: Žárovzdorné desky Tibrex [10]	45
Obr. 35: Schéma zaformování nálitku [12].....	51
Obr. 36: Závislost celkové doby tuhnutí na tloušťce izolace Plastizol a Sibral pro nálitek průměru 160 a výšky 100 mm. [12].....	52
Obr. 37: Srovnání ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a Sibral pro nálitek průměru 160 a výšky 100 mm [12]	53
Obr. 38: Srovnání ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a sibral pro nálitek průměru 300 a výšky 100 mm [12]	53

13. Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdíly v dosazovací schopnosti a velikosti kontaktní plochy u různých typů nálitků.....	26
Tab. 2: Závislost λ na T	28
Tab. 3: Závislost λ na T	29
Tab. 4: Závislost λ na T	30
Tab. 5: Závislost c na T	30
Tab. 6: Závislost ρv a c na m	31
Tab. 7: Závislost λ na T	31
Tab. 8: Závislost λ na T	32
Tab. 9: Závislost λ na T	32
Tab. 10: Závislost λ na T	32
Tab. 11: Závislost λ na T	32
Tab. 12: Závislost λ na T	33
Tab. 13: Závislost λ na T	33
Tab. 14: Závislost λ na T	33
Tab. 15: Závislost λ na T	33
Tab. 16: Závislost λ na T	34
Tab. 17: Závislost σt na ρv	34
Tab. 18: Závislost λ na T	34
Tab. 19: Závislost λ na T	34
Tab. 20: Závislost λ na T	35
Tab. 21: Závislost λ na T	35
Tab. 22: Závislost λ na T	35
Tab. 23: Závislost λ na T	35
Tab. 24: Závislost λ na T	36
Tab. 25: Závislost σt na ρv	36
Tab. 26: Závislost λ na T	36
Tab. 27: Závislost λ na T	36
Tab. 28: Přehled maximálních teplot modulů Kerablok.....	37
Tab. 29: Závislost λ na T	37
Tab. 30: Závislost λ na T	37
Tab. 31 Závislost λ na T	37
Tab. 32: Závislost ρv na T	38
Tab. 33: Závislost λ na T	39
Tab. 34: Závislost λ na T	40
Tab. 35 Závislost λ na T	40
Tab. 36 Závislost λ na T	41
Tab. 37 Závislost λ na T	41
Tab. 38 Závislost λ na T	42
Tab. 39: Závislost ρv na T	42
Tab. 40: Závislost λ na T	43
Tab. 41 Závislost ρv na T	43
Tab. 42: Závislost λ na T	43
Tab. 43: Závislost ρv na T	44
Tab. 44 Závislost λ na T	44
Tab. 45: Závislost ρv , σt a c na T	44

Tab. 46	Závislost λ na T	44
Tab. 47:	Závislost λ na T	45
Tab. 48:	Závislost ρv a σt na T	45
Tab. 49:	Závislost λ na T	45
Tab. 50:	Závislost λ na T	46
Tab. 51:	Závislost λ na T	46
Tab. 52:	Závislost ρv , σt a c na T	46
Tab. 53:	Závislost λ na T	47
Tab. 54	Závislost ρv , σt a c na T	47
Tab. 55	Závislost λ na T	47
Tab. 56:	Doporučené dávkování Granexu.	48
Tab. 57:	Doporučené dávkování Ferro G	48
Tab. 58:	Doporučené dávkování Ferro G50	49
Tab. 59:	Doporučené dávkování Ferro 25	49
Tab. 60:	Doporučené dávkování Ferro 40	49
Tab. 61:	Srovnání účinku ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a Sibal na celkovou dobu tuhnutí nálitku o průměru 160 mm.	53
Tab. 62:	Srovnání účinku ekvivalentních tloušťek izolace Plastizol a Sibal na celkovou dobu tuhnutí nálitku o průměru 300 mm.	54