



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VLIV TVARU ODLITKŮ NA VYUŽITÍ NÁLITKŮ

INFLUENCE OF CASTING SHAPE ON THE YIELD OF FEEDERS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Blažek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Petr Blažek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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:

## Vliv tvaru odlitků na využití nálitků

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nálitky jsou používány při výrobě odlitků k minimalizaci objemových změn při tuhnutí odlitků, ke kterým dochází při změně skupenství z taveniny na tuhou fázi. Pro zlepšení dosazovací schopnosti nálitků jsou používány kromě přirozených nálitků též izolační a exotermické nálitky. Ty umožňují prodloužení doby tuhnutí nálitku při zachování jeho objemu. Využití nálitku je kromě materiálu nálitku silně ovlivněno také tvarem odlitku, na kterém je nálitek umístěn. Vliv tvaru odlitku na využití nálitku bývá nejčastěji popisován dle tzv. tvarového faktoru.

### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést literární rešerši na téma nálitkování a tuhnutí kovů a slitin a to zejména slitin hliníku. Na základě teoretického rozboru provést návrh vhodného experimentu pro ověření vlivu tvarového faktoru odlitku na využití a funkčnost použitého nálitku. Pro navržený experiment provést ověření funkčnosti a využití nálitku též pomocí numerické simulace chladnutí a tuhnutí odlitku.

### Seznam doporučené literatury:

ELBEL, T. a kol. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 340 s.

ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.

MICHNA, Š. Encyklopedie hliníku. Děčín: Adin, s.r.o., 2005, 722 s. ISBN 80-890-4188-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

BLAŽEK Petr: Vliv tvaru odlitků na využití nálitků.

Bakalářská práce se zabývá vlivem tvaru odlitků na využití nálitků. V teoretické části je popsáno nálitkování, tuhnutí kovových materiálů a popis a vady hliníkových slitin, zejména použitého materiálu DIN 226. V praktické části je popsán návrh experimentu, provedené zkoušky a jejich výsledky. Pro porovnání tvaru byly odlity 4 různé geometrie odlitku vždy s nálitkem P69I. Na zkušebních odlitcích byla provedena kapilární zkouška, zkouška porovnání hustot. Dále byl změřen DAS index a stanoveno využití nálitku v závislosti na tvaru a modulu odlitku.

Klíčová slova: nálitky, využití nálitků, tvary odlitků, DIN 226, modul

## **ABSTRACT**

BLAŽEK Petr: Influence of casting shape on the yield of feeders

The Bachelor thesis deals with the influence of the shape of the casting on the yield of the feeders. The theoretical part describes the feeders, solidification of metallic materials and the description and defects of aluminium alloys, in particular the material used: DIN 226. The practical part describes the proposal of the experiment, the tests performed and their results. To compare the shape, 4 different geometries of the casting were cast each with feeder P69I. A capillary test, a density comparison test, was performed on the test casts. In addition, the DAS index was measured and the yield of the feeders was determined depending on the shape and module of the casting.

Keywords: feeders, yield of feeders, shapes of castings, DIN 226, module

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BLAŽEK, Petr. *Vliv tvaru odlitků na využití nálitků* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132808>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V ..... dne 21.5.2021

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji vedoucímu mé práce, panu doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za účelné vedení této práce. Děkuji za věcné rady a připomínky při vypracování práce. Dále bych chtěl poděkovat všem z odboru slévárenství FSI, kteří se podíleli na pomoci s praktickou částí, zejména panu Ing. Martinu Myškovi. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

# OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
	Str.
<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 TUHNUTÍ</b> .....	10
<b>1.1 Usměrněnost tuhnutí</b> .....	11
<b>1.2 Konstrukční zásady pro eliminaci vad odlitků</b> .....	13
1.2.1 Změna konstrukce .....	14
1.2.2 Chlazení tepelných uzlů .....	14
<b>2 NÁLITKY</b> .....	16
<b>2.1 Tepelné režimy nálitků</b> .....	17
2.1.1 Přirozené nálitky .....	18
2.1.2 Izotermické nálitky .....	18
2.1.3 Exotermické nálitky .....	19
<b>2.2 Poloha nálitků</b> .....	20
<b>2.3 Tvary nálitků a jejich obalů</b> .....	21
2.3.1 Tvary a použití obalů nálitků .....	22
<b>2.4 Využití nálitků</b> .....	24
<b>3 MATERIÁL DIN 226</b> .....	27
<b>3.1 Vady odlitků ze slitin hliníku</b> .....	27
<b>4 EXPERIMENT</b> .....	30
<b>4.1 Návrh geometrického tvaru odlitku</b> .....	30
<b>4.2 Návrh vtokové soustavy pro odlitek</b> .....	31
<b>4.3 Modul a tvarový faktor</b> .....	33
<b>4.4 Popis experimentu</b> .....	34
<b>4.5 Vyhodnocení experimentu</b> .....	36
<b>5 ZÁVĚRY</b> .....	43
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	



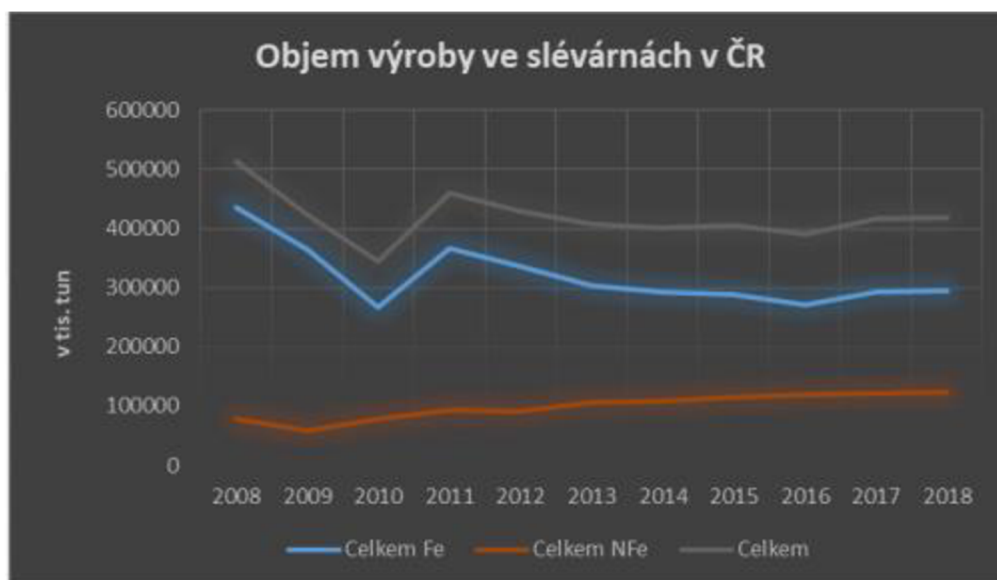
## ÚVOD

Podle [1–2] se v českých slévárnách ročně vyrobí přibližně 400 000 tun odlitků. Z toho cca čtvrtina jsou odlitky ze slitin hliníku. Trend výrobnosti odlitků z železných a neželezných kovů je možné vidět na **obr. 1**. V Česku dochází čím dál více k nahrazování slitin na bázi železa lehčími neželeznými kovy. [1–2]

Tlak na výrobnost a konkurenceschopnost sléváren podpořil vývoj tzv. exotermických izotermických nálitků, které významně prodlužují dobu tuhnutí kovu v nálitku oproti klasickým přirozeným nálitkům. Tyto nálitky díky přidání a udržení tepla v nálitku mohou zvýšit využití kovu až na 70 %. Díky vyššímu využití kovu exotermických a izotermických nálitků je možné použít menší nálitky při zajištění stejné funkce. Je však nutné mít stále na paměti objemovou dostatečnost nálitku.

Při použití menších nálitků se snižují náklady na manipulaci a na tavení kovu. I při vyšší ceně exotermických a izotermických nálitků se náklady na odlitek výrazně snižují. Náletek má velký vliv na množství spotřebovaného kovu. Jeho úpravou (velikost a typ) je možné významně ovlivnit ekonomiku sléváren, a tím zajistit vyšší konkurenceschopnost na trhu. Podle literatury [3] by slévárna podle sortimentu měla mít roční využití kovu (včetně neshodných kusů) v rozsahu 55–68 %. [3]

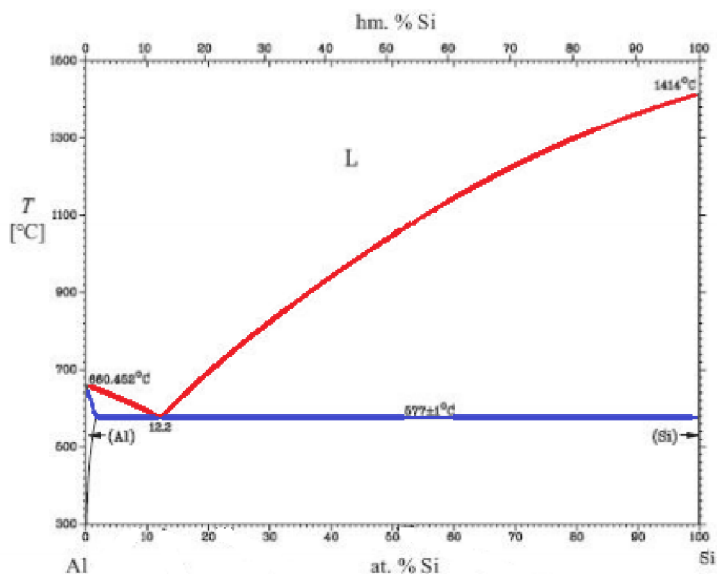
Literatura [3] uvádí, že by odlitek stejného objemu měl mít využití nálitku stejné, ale u tenkostěnných odlitků by měla být staženina mělká (výhodnější). Díky mělké staženině je možné používat menší náletek, protože staženina nebude zasahovat do odlitku. [3]



Obr. 1 Výroba odlitků z železných a neželezných slitin v ČR [2].

## 1 TUHNUTÍ

Tuhnutí slitin probíhá při ochlazování taveniny v určitém teplotním pásmu, mezi křivkou solidu a likvidu. Křivka likvidu je křivka, která udává teplotu počátku tuhnutí pro určité složení kovu. Křivka solidu je dána koncem tuhnutí pro dané chemické složení. Na **obr. 2** je uveden dvoufázový diagram hliníku a křemíku. Křivka likvidu je vyznačena červeně a křivka solidu modře. Z diagramu je zřejmé, že mírná změna koncentrace křemíku ve slitině může mít významný vliv na interval tuhnutí. Nejužší interval tuhnutí mají eutektické slitiny. Nadeutektické slitiny zde mají široké dvoufázové pásmo. [4–5]

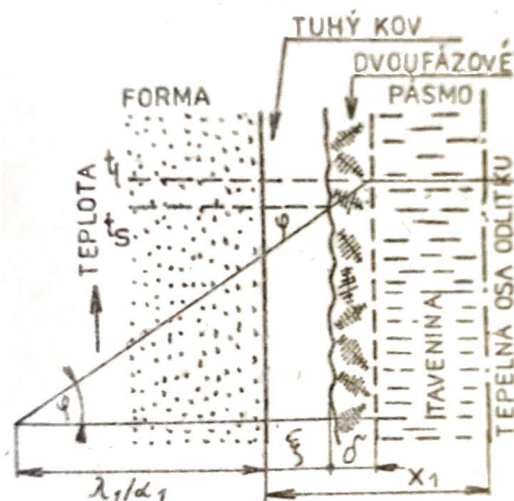


Obr. 2 Fázový diagram Al-Si [5].

Během tuhnutí slitin mohou vedle sebe současně existovat tři pásma:

- Tuhé,
- Dvoufázové,
- Kapalné [4].

Tuhé pásmo se při tuhnutí zvětšuje, kapalné se zmenšuje a dvoufázové pásmo mění velikost podle intervalu tuhnutí slitiny a rychlosti ochlazování slitiny. Tato pásma znázorňuje **obr. 3**. Tepelná osa je místo nebo plocha, kde se setkají tuhá pásma z různých stran odlitku (místo posledního tuhnutí). U válcových součástí (neovlivněné okolím) bývá tepelná osa totožná s geometrickou osou odlitku. [4]



Obr. 3 Tuhnutí slitiny [4].

V závislosti na šířce dvoufázového pásma se v odlitku může tvořit mikropórovitost. Např. slitiny hliníku nebo mědi tuhnou v celém objemu (tzv. kašovité), a proto mají vyšší sklon k tvorbě mikropórovitosti než např. oceli nebo litiny. [4]

Při přirozeném (zvenčí neovlivněném) tuhnutí dochází v určité chvíli ke zrychlení tuhnutí kovu. Rychlost je zvýšena v důsledku zvýšení vodivosti již ztuhlé části odlitku a změně modulu odlitku. Pro vyšší homogenitu odlitku je vhodné použít rychlejší ochlazování odlitku. Rychlejší tuhnutí způsobuje jemnější strukturu, vyšší mechanické vlastnosti, menší odmíšení prvků (lokální změna složení) a nižší výskyt ředin. Pomalejší rychlost tuhnutí má kladný vliv na středovou (osovou část) odlitku, kde je vyšší riziko vzniku mikrostaženin. Pro nejlepší mechanické vlastnosti a homogenitu struktury literatura [4] doporučuje dvojí rychlost tuhnutí. Ze začátku je doporučena vyšší rychlost tuhnutí kovu v odlitku a pro tuhnutí střední oblasti je doporučena nižší rychlost tuhnutí kovu v odlitku. [4]

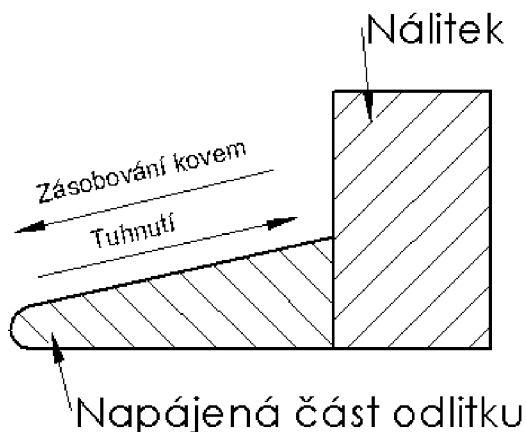
Aby bylo vůbec možné odlitek odlít a aby byla výroba ekonomická, je třeba správně navrhnout tvar odlitku. Tvar odlitku by měl zajišťovat:

- usměrněnost tuhnutí,
- zaběhnutí kovu do všech míst odlitku,
- co nejmenší vnitřní napětí v odlitku,
- eliminaci nebezpečných míst odlitku (tepelné uzly, ostré hrany...),
- požadované mechanické vlastnosti odlitku,
- požadované konstrukční (tvarové) prvky (např. spojovací části součástí) [4].

Usměrněnost tuhnutí zajišťuje, aby odlitek byl pomocí náliček správně zásobován tekutým kovem při tuhnutí. Na zaběhnutí kovu do všech míst má vliv tloušťka stěny, tvar a složitost odlitku, poloha vtokové soustavy a teplota lití. Vnitřní napětí jsou v odlitku vždy, snaha je, aby byla co nejmenší. K eliminaci vnitřního napětí a tepelných uzlů je třeba dodržovat konstrukční zásady výroby odlitků. Např. by se mělo zabránit přímému spojení částí odlitku s výrazně rozdílnou tloušťkou stěn. Mechanické vlastnosti jsou dány zejména druhem materiálu, tloušťkou stěny a způsobem lití (v pískových formách, v kovových formách, odstředivé lití ...). Usměrněnost tuhnutí a konstrukčním zásadám pro eliminaci vad v odlitku budou věnovány následující podkapitoly 1.1–1.2. [4, 6]

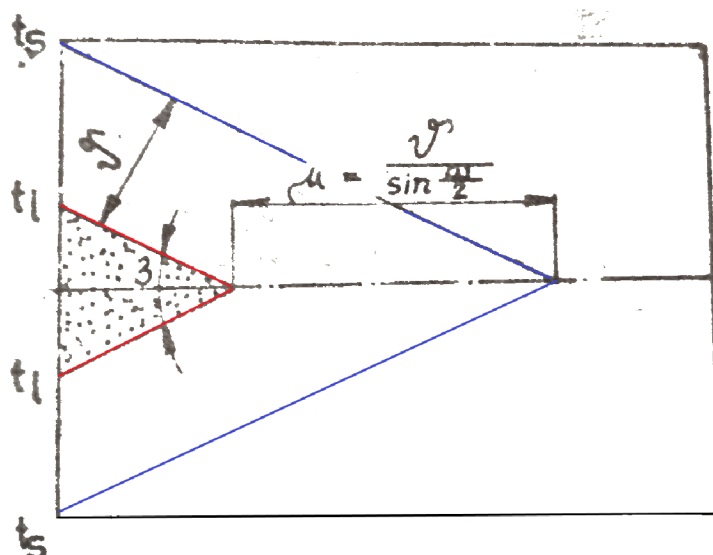
## 1.1 Usměrněnost tuhnutí

Tuhnutí kovu začíná od nejstudenějšího místa odlitku a postupuje k teplejším místům. Aby mohl náliček zásobovat odlitek tekutým kovem je třeba zajistit usměrněnost tuhnutí. Na **obr. 4** nemá napájená část odlitku konstantní průřez, ale má určité zkosení. Zkosení o správném úhlu může zajišťovat usměrněnost tuhnutí. Pokud by odlitek nesplňoval usměrněnost tuhnutí, mohlo by dojít k případné deformaci odlitku. [4, 6]



Obr. 4 Schéma zásobování a tuhnutí usměrněného odlitku [6].

Konkrétněji popisuje mechanismus tuhnutí **obr. 5**. Zde je možné vidět tuhnutí v odlitku pod úhlem  $\omega$ . Literatura [4] uvádí, že úhel  $\omega$  průměrně bývá pro oceli 6–8°. Šířka dvoufázového pásma je  $v$ ,  $\mu$  znázorňuje velikost dvoufázového pásma v tepelné ose. Teplota solidu  $t_s$  je znázorněna modře a teplota likvidu červeně. **Obr. 4 a 5** naznačují, že pro zdravý průběh tuhnutí odlitku je vhodný postup chladnutí od konce odlitku až k nálitku. Dále je výhodné, aby šířka dvoufázového pásma nebyla příliš velká. Což je problematické zajistit obzvláště u některých slitin hliníku. [4]



Obr. 5 Vyjádření usměrňenosti tuhnutí odlitku [4].

Pro znázornění časů a usměrňenosti tuhnutí v různých místech odlitku byl vyvinut tzv. modul. Jedná se o hodnotu, která udává poměr objemu součásti vůči formou chlazenému povrchu součásti. Modul  $M$ , někdy uváděn též jako relativní tloušťka tělesa [3], je udáván většinou v centimetrech a vypočítá se ze vztahu [3, 4, 6]:

$$M = \frac{V}{S} \quad (1)$$

kde

$V$  je objem zkoumaného tělesa [ $\text{cm}^3$ ],

$S$  je tzv. ochlazovaný povrch nálitku nebo části odlitku, který není v kontaktu s jinou částí odlitku. Počítá se povrch, který není ohříván ani izolovaný [ $\text{cm}^2$ ].

Modul je základním kritériem pro návrh tvaru a velikosti nálitku a tuhnutí odlitků. Tvar odlitku a rychlost tuhnutí kovu v odlitku ovlivňuje krystalizaci a výskyt slévárenských vad. Velikost modulu ovlivňuje také velikost zrna. Na velikosti zrna jsou pak závislé zejména mechanické vlastnosti. Modul predikuje, která část odlitku dříve ztuhne. Náletek by měl mít větší modul než napájená část, aby došlo k zásobování kovu z nálitku do odlitku.

Pro posouzení tvaru odlitku se využívá také tzv. tvarový faktor  $q$ , který je vyjádřen vztahem [3, 6]:

$$q = \frac{V}{M^3} \quad (2)$$

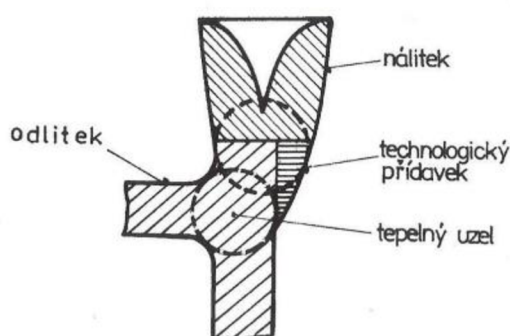
Usměrněnost tuhnutí se dá zajistit např. zkosením (viz **obr. 4**). Dalším způsobem je přídavné zahřívání nebo chlazení určité části odlitku. U exotermických nálitků se využívá principu přidaného tepla (viz kapitola 2). Pro chlazení se používají tzv. chladítka (viz podkapitola 1.2.2).

## 1.2 Konstrukční zásady pro eliminaci vad odlitků

Při nesprávné konstrukci odlitků vznikají v různých místech staženiny, mikrostaženiny řediny a vnitřní napětí. Největším problémem bývají tzv. tepelné uzly a napojení stěn s rozdílnou tloušťkou. [4, 7]

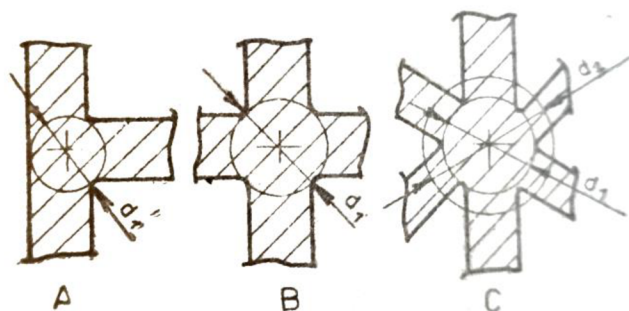
Reálný odlitek není ideální, má ve svém objemu stěny s rozdílnou tloušťkou a obsahuje také tepelné uzly. Tepelné uzly jsou místa, která lokálně ztuhnou naposledy. Tato místa jsou nebezpečná, protože v místě posledního tuhnutí vznikají staženiny. Příkladem tepelných uzlů mohou být spoje stěn nebo různé tvarové prvky odlitku. [4]

Místa tepelných uzlů se identifikují např. pomocí tzv. metody vepsaných koulí. Jde o metodu, ve které do odlitku vložíme pomyslnou vepsanou kouli nebo v řezu vepsanou kružnici. Koule se musí dostat z krajů odlitku až do nálitků, přičemž se může pouze zvětšovat (**obr. 6**). Pro dosažení požadovaných tvarů se často používají technologické přídavky. [4, 7]



Obr. 6 Znárodnění metody vepsaných koulí [7]

Na **obr. 7** jsou kružnicemi znázorněna místa tepelných uzlů. Je zde ukázána změna velikosti tepelného uzlu v závislosti na počtu napojených stěn. Větší velikost kružnice (relativně) předpokládá větší staženinu. Na **obr. 7C** je znázorněna odchylka absolutní velikosti tepelného modulu  $d_2$  od relativní  $d_1$ . Z toho vyplývá, že při složitější konstrukci dochází k zvětšení rizika vzniku vady, než by se očekávalo z velikosti vepsané kružnice. Zvětšení rizika vzniku staženiny závisí na složitosti tvaru tepelného spoje a na chladicím účinku formy. Pokud se forma kolem uzlu prohřeje, zvětšuje se i tepelný modul uzlu. [4]



Obr. 7 Tepelné uzly [4].

Eliminace tepelných uzlů se řeší třemi způsoby:

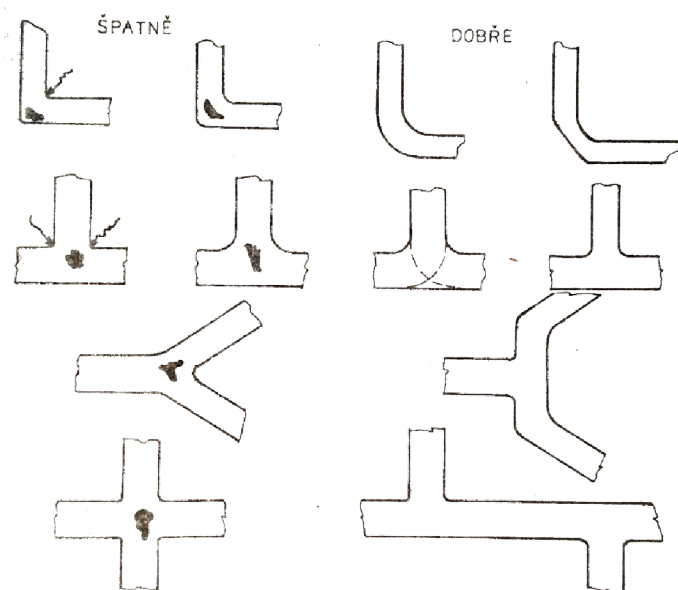
- změnou konstrukce,
- nálitkováním,
- chlazením [4].

Změna konstrukce obvykle zahrnuje změnu ostrých hran na rádiusy optimální velikosti nebo přemístění (posunutí) stěn odlitku. Nálitkování eliminuje tepelné uzly obzvláště tam, kde není vhodné změnit konstrukci např. pro nutné a objemné prvky součásti. Více o nálitkování v kapitole 2. Chlazení je charakteristické vyšším odvodem tepla než formou z místa tepelného

uzlu. Větší množství odebraného tepla je způsobeno přítomností chladicího materiálu s vyšší tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitou.

### 1.2.1 Změna konstrukce

Na **obr. 8** jsou znázorněny různé, nevhodně navržené konstrukce odlitku a jejich konstrukční úpravy. Dále je možné vidět, že pro odlitky není vhodné používat ostré rohy, jak vnější, tak vnitřní. Nejsou vhodné ani křížové spoje, ale z hlediska tepelných uzlů je výhodnější jednu stěnu posunout a tím spoj rozdělit na dva menší. Spoje tvaru „Y“ bývají nahrazovány spojem tvaru „T“, který by měl mít menší tepelný uzel. [4]



Obr. 8 Spoje a přechody stěn [4].

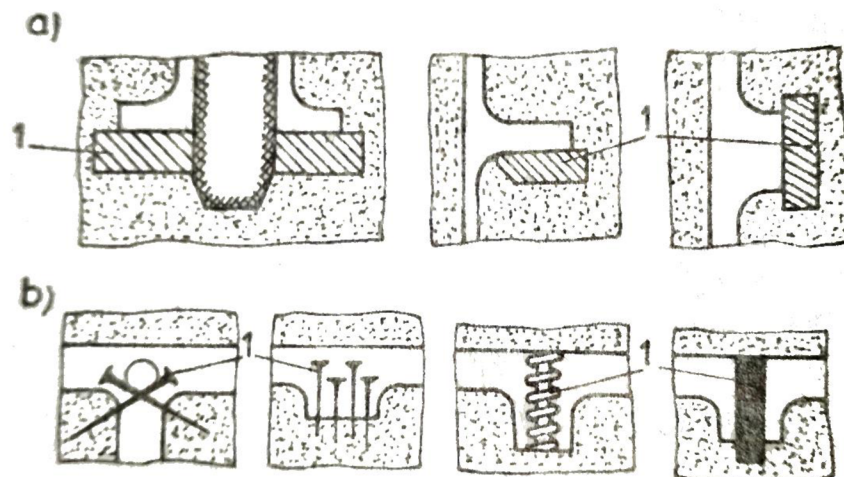
Většinou je snaha, aby odlitek měl co nejjednodušší tvar (snadnější příprava výroby, jednodušší výroba, méně tepelných uzlů atd.). V některých případech ale musí být tvar součásti upraven do složitějších tvarů. Důvodem bývá zajištění konstantní tloušťky a eliminace tepelných uzlů. Příkladem může být např. výroba roštu. U jiných zejména větších součástí je někdy nutné součást rozdělit na několik menších dílů, které se následně šroubovými a dalšími metodami spojí dohromady. [4]

### 1.2.2 Chlazení tepelných uzlů

Chlazení odlitků se dělí na vnější a vnitřní. Vnější chladítka jsou vhodná pro menší tepelné uzly. Výhodou vnějších chladítek je, že nezpůsobí kritické podchlazení ochlazované části odlitku. Vnitřní chladítka jsou vhodná jak pro malé, tak pro velké tepelné uzly. Nevýhodou může být přechlazení určité části odlitku. Přechlazení by vlivem smrštění vedlo ke zvýšení vnitřních pnutí, případně k prasklinám. [4]

Obecně je vhodné používat chladítka spíše na části odlitku vzdálenější od vtokové soustavy, protože chladítka, přes které proudí větší množství kovu, vyčerpají svou kapacitu na protékajícím kovu. Pro samotné tepelné uzly pak mají menší účinnost. Pro tepelné uzly přilehlé k vtokové soustavě je vhodnější jejich eliminace nálitkováním. [4]

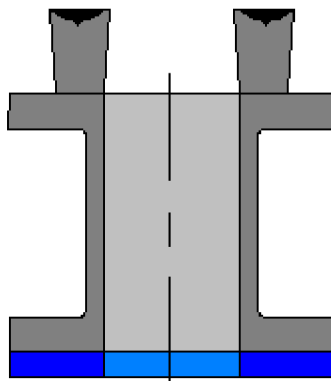
Pro chlazení bývají často použity materiály jako ocel, litina nebo grafit. Pro vnější chlazení bývá užito desek nebo proudící chladicí médium. Chladítka se umísťují do formy v blízkosti tepelných uzlů. Pro vnitřní chlazení se používají hřebíky, pružiny, válečky a další. Na **obr. 9** jsou uvedeny nejčastější způsoby a) vnějšího a b) vnitřního chlazení. Číslem 1 jsou označena chladítka. [4]



Obr. 9 a) vnější, b) vnitřní chlazení tepelných uzlů [4].

U vnějších chladítek může dojít zatečením kovu mezi formu a chladítko k vytvoření výronku. Výronek brzdí pohyb kovu při smrštění, to může vést k trhlinám v odlitku. U velkých chladítek může dojít k trhlinám v odlitku způsobeným tepelným šokem. [4, 8]

Eliminace tepelných uzlů je možná i kombinací více způsobů. Na **obr. 10** je uvedena kombinace chlazení a nálitkování v řezu odlitku. S výhodou metalostatického tlaku jsou použity nálitky na vršku odlitku a s výhodou menší průtočnosti je dole použito schematicky chladítko (modré). [4]



Obr. 10 Použití nálitků a vnějšího chladítka pro eliminaci tepelných uzlů [4].

Výhodou chladítek je, že na rozdíl od nálitků nesnižují využití odlitku. V praxi se často používá kombinace nálitků, chladítek a vhodné konstrukce odlitku. Konstrukce eliminuje co nejvíce možných tepelných uzlů. Na vrchní plochu bývají umístěny nálitky (zejména blízko vtokové soustavy). Na spodní části a na části vzdálené od vtokové soustavy bývají užita chladítka.

## 2 NÁLITKY

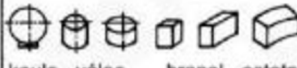

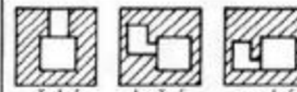

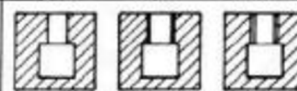

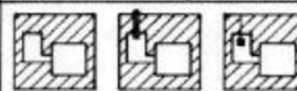

Při ochlazování kovu během tuhnutí dochází ke zmenšení jeho objemu. Zmenšení objemu je členěno na dva termíny, stahování a smrštění. Smrštění taveniny je dále členěno na smrštění v tekutém a tuhém stavu. Smrštění v tuhém stavu probíhá pod teplotou solidu a je eliminováno zvětšením modelu řádově o jednotky procent podle druhu slitiny (uhlíková ocel 1,5–2 %, šedá litina 0,5–1,1 %, bílá litina 1,5–1,8 %, Al slitiny 0,8–1,5 % [4]). Smrštění v tekutém stavu probíhá nad teplotou solidu. Stahování je součástí smrštění v tekutém stavu. Probíhá pod teplotou likvidu a nad teplotou solidu (interval tuhnutí) a je eliminováno nálitkem. Náledek je tedy zásobník kovu, který eliminuje stahování kovu, a zabraňuje tak vzniku staženin a ředin v odlitku.

Náledek musí být navržen dostatečně objemný, aby zásoboval celý odlitek nebo jeho předem určenou část. Na základě poměru hmotnosti čistého odlitku oproti hmotnosti celkem odlitého kovu do formy se používá pojem tzv. využití kovu. Literatura [6] uvádí např. u ocelových odlitků s přirozenými nálitky běžné využití kovu 50 %. Při lepší konstrukci se využití kovu odlitků s přirozenými nálitky pohybuje v rozmezí 50–60 %. [4, 8, 9, 10, 11]

Druhým důležitým parametrem nálitku je jeho doba tuhnutí. Doba tuhnutí nálitku musí být delší než doba tuhnutí zásobované části odlitku. Doba tuhnutí a využití nálitku lze zvýšit dvěma základními způsoby, izolací nálitku nebo přidáním tepla exotermickou reakcí (viz podkapitola 2.1.2 a 2.1.3). [9, 10]

Nálitky jsou buď otevřené, nebo uzavřené (viz **obr. 11** vpravo dole). Uzavřené jsou celé uvnitř formy, používají se zejména pro zásobování tepelných uzlů ve spodní části odlitku nebo např. u některých slévárenských technologiích, jako je Full mould [12]. Oproti tomu otevřené nálitky zasahují až do vrchní části formy. Výhodou otevřených nálitků je možnost kontrolovat výšku hladiny kovu při lití, nevýhodou je oxidace taveniny a tepelné ztráty v místě hladiny nálitku. Tepelné ztráty se snižují zasypaním hladiny nálitku izolačním nebo exotermickým zasypaním (viz podkapitola 2.1.2 a 2.1.3). [12]

Nálitky se dají dále členit podle mnoha kritérií, jako jsou tvar, umístění, tepelný režim a další. Na **obr. 11** je uveden příklad rozdělení nálitků dle některých základních kritérií [13].

ZNAK	SCHÉMATICKÝ OBRÁZEK	ZNAK	SCHÉMATICKÝ OBRÁZEK
Tvar	 koule válec hranol ostatní	Poloha	 odlehlý přيهlý kombinace
Umístění	 čelní boční spodní	Uspořádání	 samostatný společný
Tepelný režim	 normální izolovaný exotermický	Způsob oddělení	 řezání urážení
Tlak	 podtlakový atmosférický přetlakový	Provedení	 otevřený uzavřený

Obr. 11 Rozdělení nálitků [13].

V této kapitole budou níže popsány jednotlivé druhy nálitků. V podkapitole 2.1 budou popsány obaly nálitků z hlediska tepelného režimu. V další podkapitole 2.2 se probere umístění nálitků a vliv polohy nálitků na jejich funkci. Ve třetí části kapitoly 2 (tedy 2.3) budou rozebrány tvary a možnosti použití obkladů. Pro účely této práce je důležité znát vlivy, které ovlivňují využití nálitku, jako jsou např. tvar odlitku nebo druh použitého nálitku. Touto problematikou se bude zabývat podkapitola 2.4.



## 2.1 Tepelné režimy nálitků

Nálitky je možné dělit podle tepelné funkce obalového materiálu:

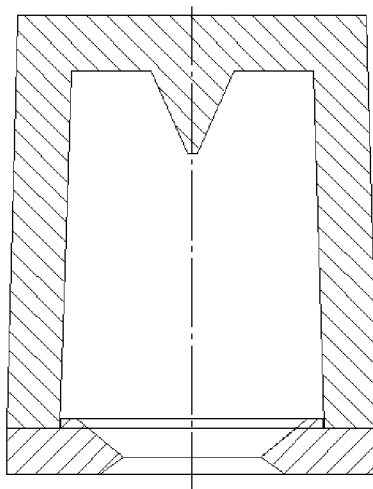
- Přírozené – Přírozený náliček je obklopen pouze formovací směsí bez jakýchkoli obalů. Tvar nálitku se předformuje pomocí modelu při výrobě formy.
- Izotermické – Doba tuhnutí nálitku je u izotermických nálitků prodloužena použitím izolačního materiálu okolo nálitku, který zpomalí odvod tepla z kovu do formy. Druhy izotermických nálitkových obalů lze rozdělit na:
  - Zasypané,
  - Obložené,
  - Izolované dutinami ve formě.

Zásyp je používán ve formě prášku, který na hladině kovu v otevřeném nálitku zpomaluje odvod tepla do okolí. Obložení je nástavec určitého tvaru a rozměru, který je před výrobou formy vložen a zasypan formovací směsí. Při výrobě forem 3D tiskem se nálitky izolují vzduchovými dutinami okolo nálitku (viz podkapitola 2.1.2). [11]

- Exotermické – Jsou nálitky, kde teplota kovu v exotermickém nálitku je zvýšena vnesením tepla vzniklého zpravidla aluminotermickou reakcí. Exotermické nálitky mohou být:
  - Zasypané,
  - Obložené.

Obklady nálitků jsou dostupné v různých variantách. Na **obr. 12** je uveden příklad jednoho z používaných tvarů obalů nálitku od výrobce FAPROSID, s. r. l. (typ P [14]). Část obalu ve tvaru hranolu s podstavou rovnostranného lichoběžníku je Williamssovo jádérko. Jádérko zvyšuje využití nálitku a používá se u většiny typů uzavřených obalů nálitků. V některých případech bývá s obalem nálitku použita i podnálitková podložka, která svým tvarem umožňuje snadnější odstranění nálitku od odlitků. Podložka nijak nesnižuje funkci nálitku, protože se rychle prohřeje na vysokou teplotu. Důležité však je, aby osa podložky byla totožná s tepelnou osou nálitku. Podložky jsou často vyrobeny z obalované směsi (croning) nebo bývají předformované z formovací směsí, [4, 14]

Podrobnější rozbor tvarů a různých způsobů použití obkladů je uvedeno v podkapitole 2.3.



Obr. 12 Obklad nálitku s podnálitkovou podložkou [14].

### 2.1.1 Přirozené nálitky

Nálitky přirozené jsou výrobně nejjednodušší, protože není třeba žádný speciální materiál (obklad), který by bylo nutné nakupovat nebo vyrábět. Jsou zhotoveny zaformováním modelu nálitku potřebného tvaru a velikosti. Po vyjmutí modelu vzniká dutina, která plní funkci přirozeného nálitku. Nevýhodou přirozených nálitků je podstatně nižší využití kovu způsobené intenzivnějším odvodem tepla formou oproti izotermickým a exotermickým nálitkům. Přirozené nálitky jsou tak objemnější, aby zajistily dosazování kovu a aby doba tuhnutí byla delší než doba tuhnutí odlitku nebo jeho nálitkované části. Přirozené nálitky se využívaly od počátku slévárenství, dnes jsou kvůli nižšímu využití na ústupu, ale stále mají své uplatnění zejména kvůli rychlosti a jednoduchosti použití a kvůli nižším výrobním nákladům na výrobu formy. [10]

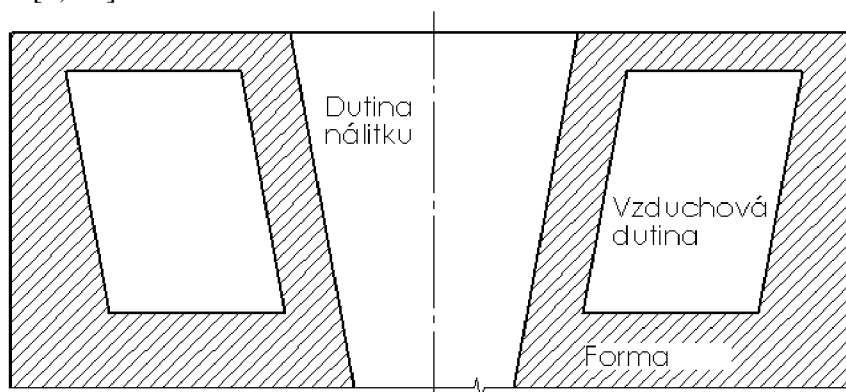
### 2.1.2 Izotermické nálitky

Pro vyšší využití kovu je možné použít izotermických nebo exotermických obalů nálitků. Funkce izotermického nálitku spočívá ve snížení tepelné vodivosti izolačním žáruvzdorným materiálem (obvykle na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{SiO}_2$ ), který bývá většinou pórovitý (používají se i jiné materiály, např. vláknité nebo ze žáruvzdorných keramických kuliček – LDASC obklady atd.). [10, 15]

U pórovitého materiálu se na izolaci podílí vzduch v pórech. Izolační obal výrazně snižuje odvod tepla, tím zajistí delší dobu tuhnutí nálitku. Díky delší době tuhnutí nálitku je možné s výhodou ekonomické úspory nálitek zmenšit, při zachování stejného tepelného modulu. [10]

Hladina kovu v nálitku může být také zasypaná izolačním materiálem. Využívají se materiály s nízkou hustotou, např. expandovaný perlit nebo vermikulit. Tento způsob se používá u otevřených nálitků pouhým nasypáním vhodného materiálu na hladinu kovu v nálitku ještě v průběhu lití nebo těsně po odlití. Tím se zamezí reakce s atmosférou a sníží se i odvod tepla z hladiny taveniny. [10]

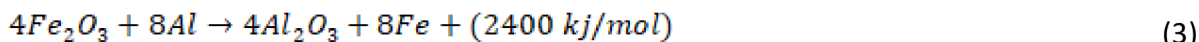
Druhým způsobem je použití izotermických obkladů. Při formování se místo modelu nálitku použije obklad, ve kterém je vytvořena dutina pro nálitku, obklad zůstane ve formě, kde bude snižovat odvod tepla z nálitku. Způsob je velmi efektivní pro odlitky středně velkých a velkých odlitků, protože izolační materiál izoluje po celou dobu chladnutí a tuhnutí odlitku. Více o obkladech nálitků v podkapitole 2.3. Třetím způsobem méně používaným je podle [11] izolace vytvořením vzduchových dutin v blízkosti nálitku. Tento způsob je využitelný pouze u forem tisknutých 3D tiskem. Funkce je založena na podobném principu jako izolace pórovitými materiály, v obou případech je použit vzduch jako špatný vodič tepla, zde je vzduch v dutinách kolem nálitku. Na **obr. 13** je znázorněna vzduchová dutina, která izoluje nálitku. [9, 11]



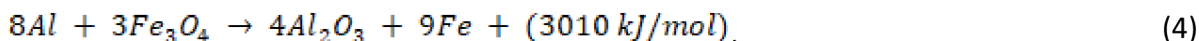
Obr. 13 Nálitku izolovaný vzduchovými dutinami [11].

### 2.1.3 Nálitky exotermické

Při kontaktu exotermického materiálu s kovem dojde k aluminotermické reakci (tzv. zapálení nálitku), při které se uvolní množství tepla. Základní reakce jsou popisovány ve tvaru [10]:



nebo



Po zapálení nálitku dochází k redukci  $Fe_2O_3$  (nebo  $Fe_3O_4$ ) hliníkem. Vzniká oxid hlinitý, železo a uvolňuje se množství tepla. Teplo vzniká díky exotermické reakci probíhající při vzniku oxidu hlinitého. Základní reakce probíhá podle rovnice (3) nebo (4) v závislosti na poměru hliníku, železa a kyslíku. Přítomnost samostatného železa má negativní vliv na izolační vlastnosti nálitku (zvyšuje odvod tepla). Proto při větším množství exotermické reakce dochází k většímu snížení izolačního efektu. Aby se teplo v exotermickém nálitku udrželo co nejdéle, je využíváno i izolačního efektu obalu. Snaha je, aby obzvláště po skončení exotermické reakce byl izolační efekt nálitku co nejvyšší. Je tedy možné setkat se s různou kombinací exotermického a izolačního efektu obalu nálitku. [10]

Do reakce se přidávají přídavné prvky (materiály), které se podílí na reakci a ovlivňují ji (zpomalují reakci, posunují zápalnou teplotu, mění výhřevnost atd.). Dříve se v exotermických obalech hojně používaly směsi s fluoridem, hlavně kvůli významnému vlivu na výhřevnost exotermické směsi. Dnes je nahrazován jinými materiály, kvůli ekologii a negativnímu vlivu na strukturu odlitku zejména na litinu s kuličkovým grafitem. [6, 10]

Velikost uvolněného tepla závisí na velikosti reakční plochy, na složení exotermického materiálu (množství a složení přídavných prvků a množství prvků ze základních rovnic). Dále je množství tepla ovlivněno vlhkostí obkladu, teplotou kovu atd. Díky zmíněné reakci je možné používat menší nálitky při zajištění stejného tepelného modulu nálitku (více v podkapitole 2.4).

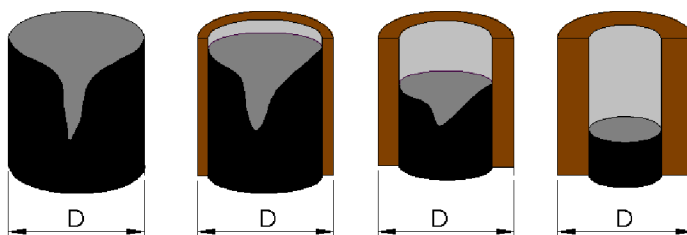
Aluminotermická reakce kladně ovlivňuje také zabíhavost kovu. Podle [9] dochází v odlitku po exotermické reakci k většímu vnitřnímu pnutí při smrštění než u odlitků, kde nebyla použita exotermická reakce. Další nevýhodou exotermických nálitků, při použití u litiny s kuličkovým grafitem, může být podle [10] degradace tvaru grafitu. Degradace je podle [10] způsobena přítomností hliníku z obalu nálitku. Vzhledem k vyšší afinitě kyslíku k hořčíku je pravděpodobnější, že degradace kuličkového grafitu je zde způsobena spíše reakcí kyslíku a hořčíku. Hořčík přestává modifikovat litinu, a tím dochází k degradaci grafitu. U nálitků s vysokým využitím může dojít k smíchání kovu z odlitku a kovu z nálitku. Kov z nálitků může mít díky exotermické reakci větší podíl kyslíku. S větším podílem kyslíku roste pravděpodobnost výskytu degradace grafitu u litin s kuličkovým grafitem. [9, 10]

Exotermické nálitky mohou být použity opět jako zásyp nebo exotermickým obalem. Zasypané se používají obdobně jako izotermické zásypy. Opět je použito zvolené množství prášku, který se nasype na hladinu taveniny v otevřeném nálitku. Rozdíl od izolačních prášků je dvojnásobný. U exotermických prášků navíc dochází k aluminotermické reakci (vnesení tepla do taveniny). Druhým rozdílem je nižší izolační efekt oproti izotermickému zásypu. Exotermické obklady jsou zaformovány stejně jako izotermické, jejich použití je výhodné spíše pro menší nálitky, protože význam exotermu klesá se zvětšujícím se objemem nálitku. [10]

Speciálním případem exotermických nálitků s obalem jsou tzv. mini-nálitky. Jedná se o objemově menší nálitky než běžně používané exotermické nálitky. Mini-nálitka má výšku asi 2,5x větší než průměr. Dosahované využití mini-nálitky bývá až 70 % hlavně kvůli vyváženému exotermickému a izolačnímu efektu a kvůli delší době reakce. [10]

Při porovnání funkčnosti zásypů a obkladů je zásadní rozdíl v reakční ploše. Obklad působí téměř na celý plášť nálitku, zatímco zásyp pouze na horní plochu nálitku. Obklad nálitku je kvůli větší reakční ploše z hlediska přidaného tepla efektivnější.

**Obr. 14** znázorňuje vliv tloušťky exotermického materiálu nálitku na využití kovu v nálitku. Kvůli názornosti je použit jednoduchý válcový náletek bez zkosení a bez vrchní části obkladu. S rostoucí tloušťkou stěny roste množství tepla vneseného do kovu v nálitku. Při tuhnutí kovu v nálitku dochází k poklesu hladiny a ke zvětšení objemu staženiny (vyšší využití nálitku). Nadměrná tloušťka obkladu prodlužuje doby tuhnutí a zvyšuje cenu odlitku z důvodu použití dražšího obkladu. [6]



Obr. 14 Vliv tloušťky exotermického obalu na využití nálitku.

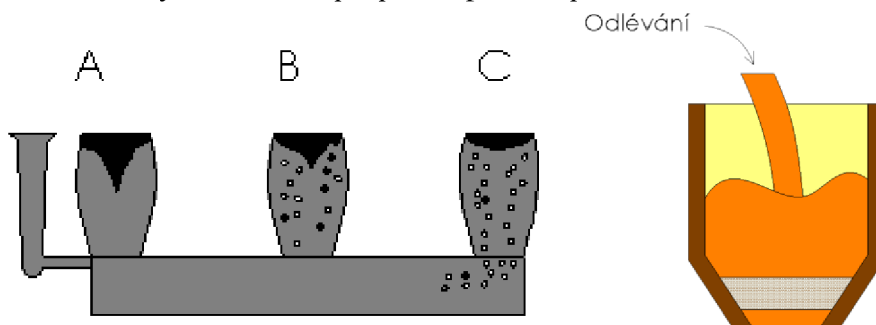
Priority ve vývoji exotermických a izotermických materiálů jsou [5]:

- nízká cena materiálu,
- nízká cena výroby obalu nálitku,
- efektivita použitého materiálu (tepelný výkon a izolační efekt),
- ekologická přijatelnost.

## 2. 2 Poloha nálitků

Nálitky je možné dělit podle jejich umístění vzhledem k vtokové soustavě:

- Přilehlý – Náletek je u vtokové soustavy,
- Klasický – Náletek je zhruba uprostřed součásti, někdy je nazýván polopřilehlý,
- Odlehlý – Náletek je umístěn na protilehlé straně od vtokové soustavy,
- Průtočný – Tavenina při plnění protéká přes náletek



Obr. 16 Přilehlý (A), polopřilehlý (B), Odlehlý (C) náletek [4]

Obr. 15 Průtočný náletek. [16].

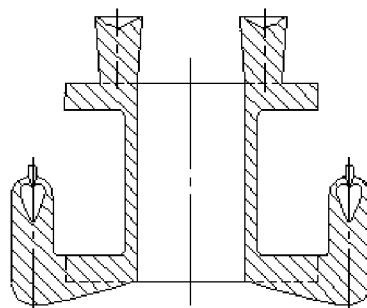
Na **obr. 15** jsou znázorněny tři nálitky, u kterých se mění objem a tvar staženiny. Na odlehlém nálitku (C) je staženina menší než na nálitku 15A a 15B. Zbývající objem je rozložen v pórech, které zasahují až do odlitku. Vliv vzdálenosti od vtokové soustavy na objem staženiny a na pórovitost je dán nižším využitím nálitku kvůli nižší teplotě kovu. Nejbližší náletek bude zaplněn teplejším kovem než vzdálenější náletek. [4, 8]

Speciální, méně používaný způsob umístění nálitku vzhledem k vtokové soustavě je tzv. průtočné umístění nálitku (viz **obr. 16**). Jedná se o náletek, do kterého je lit kov jako do

vtokové soustavy. Často je v průtočném nálitku použit filtr, který zachycuje vměstky a snižuje turbulenci při proudění kovu. Literatura [16] uvádí, že je žádoucí, aby po lití filtr vyplaval na hladinu kovu, zejména kvůli správné funkci nálitku. Výhodou je vyšší teplota kovu v nálitku (s tím je spojena delší doba tuhnutí nálitku) a lepší využití kovu (snížení množství kovu použitého na vtokovou soustavu). Dále při použití průtočného nálitku dochází k úspoře formovacího materiálu a energií z důvodu použití menších forem. Nevýhodou může být výskyt strusky a nečistot v odlitku a vyšší turbulence během odlévání. Použití je u odlitků s požadavkem na dlouhou dobu tuhnutí nálitku, obvykle s použitím izolačního obkladu. [16]

Rozdělení podle umístění vzhledem k odlitku:

- Vrchní (nálitek je umístěn na horní ploše odlitku),
- Boční (nálitek je spojen s boční stranou odlitku),
- Spodní (nálitek je umístěn ve spodní části odlitku).



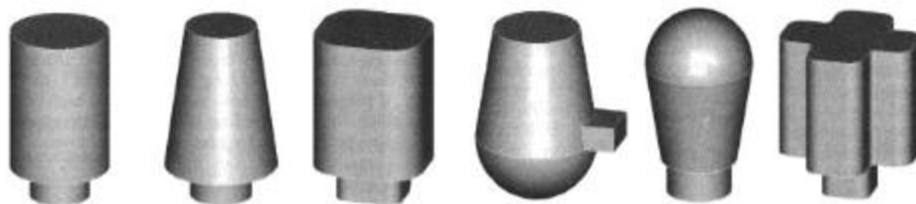
Obr. 17 Vrchní a spodní nálitek [3].

Na **obr. 17** je znázorněn odlitek s vrchními a spodními nálitky. Spodní nálitek by v tomto případě mohl být nazván i boční, protože se připojuje bokem. Vrchní nálitek s výhodou využívá metalostatického tlaku. Boční a obzvláště spodní nálitky se konstruují větší, aby se zabránilo negativnímu vlivu nižšího metalostatického tlaku, který působí proti nim. Z toho vyplývá, že spodní nálitky mají nižší využití kovu, a tím i nižší účinnost než vrchní nálitky. Pokud je to možné vzhledem k funkci a konstrukci odlitku, je vhodnější umístit nálitky co nejvýše. [3]

### 2.3 Tvary nálitků a jejich obalů

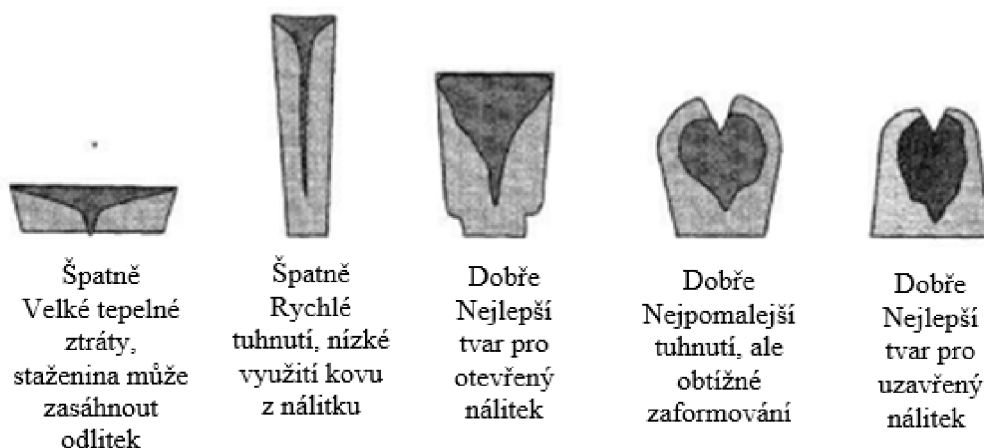
Tvary nálitků mohou být různé od polokulových přes válcové až po hranaté se zaoblenými rohy viz **obr. 18**. U nálitků je důležitým parametrem již zmíněný modul (viz podkapitola 1.1). [17]

Je snaha, aby tvary nálitků měly co největší modul, čemuž by odpovídal kulový nálitek. Nevýhodou kulového tvaru nálitku je obtížnější formování, proto se používají zejména válcové tvary a kuželové tvary s rovným nebo půlkulovým vrškem. [17]



Obr. 18 Tvary nálitků [17].

Na **obr. 19** jsou znázorněny různé tvary nálitků, které tvoří různé tvary staženin. Není vhodné, aby jeden rozměr nálitku byl výrazně jiný než ostatní (výjimkou jsou mini-nálitky, viz podkapitola 2.3.1), protože pak dochází k nižšímu využití nálitku. Poměr šířky a výšky nálitku se volí v poměru zhruba 1:1 až 1:1,5. Výška je obvykle větší kvůli metalostatickému tlaku. [18]

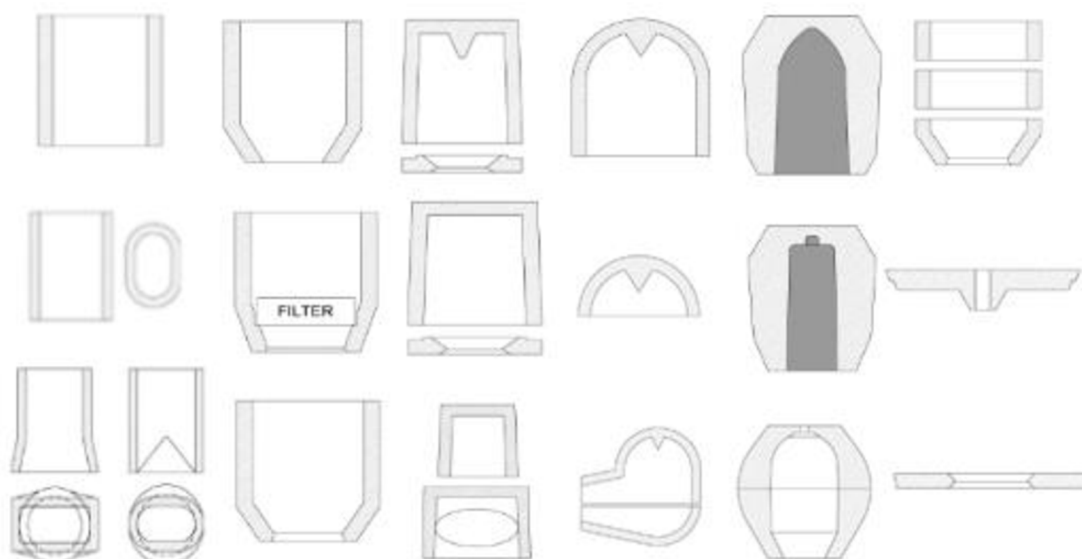


Obr. 19 Obecně dobře a špatně volené nálitky [18].

Konkrétní tvar nálitku se volí podle použití a konstrukce odlitku, viz následující podkapitola (2.3.1). Velikost nálitku, jak již bylo zmíněno, závisí na objemové dostatečnosti a na požadovaném modulu nálitku.

### 2.3.1 Tvary a použití obalů nálitků

Obaly nálitků se dělí (mimo tepelný režim) podle použití na tvarové a skládané. Tvarové mohou být pro ruční a pro strojní použití. Skládané jsou pevné a ohebné. Tvarové mají v sobě dutinu tvaru negativu nálitku. Ruční mívají přibližně konstantní tloušťku stěny, viz **obr. 20** (první čtyři sloupce). Na **obr. 20** je patrné, že se obaly používají jako otevřené i uzavřené, s Williamsovým jádrem i bez něj, s rovným i kulovým vrškem obalu nálitku. V posledním sloupci je obal složen z několika dílů, vrchní kryt nálitku a nálitková podložka. Vrchní kryt nálitku bývá používán buď s otevřeným obalem nálitku, nebo samostatně na otevřeném nálitku, jako náhrada za exotermický nebo izotermický zásyp. [10, 14, 19]



Obr. 20 Tvary tvarových obalů nálitků [14].

Strojní obaly nálitků se používají ve formovacích linkách. Tyto obaly mají tvary s různou tloušťkou stěny (viz **obr. 20** pátý sloupec), aby se zajistily vyšší mechanické vlastnosti. Strojní obklady jsou více mechanicky namáhané, proto je použit pevnější materiál oproti ručním obkladům. Tyto obaly se často používají pro tzv. mini-nálitky. Aby se obal nálitku při strojním formování správně ustavil, používají se nástavce. Nástavce jsou obvykle kovové (viz **obr. 21**), dříve byly vyráběny z formovací směsi [10, 14, 19].

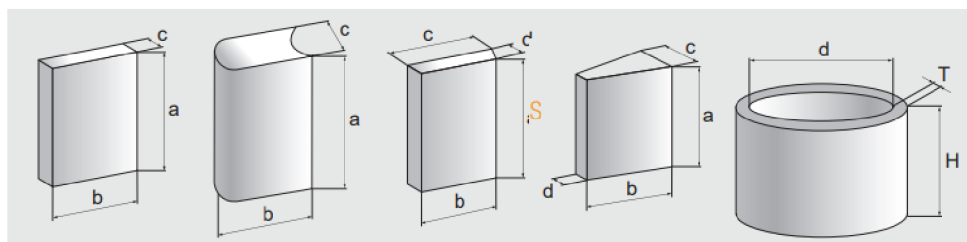


Obr. 21 Obal nálitku pro strojní formování s nástavcem [19].

Výrobci obalů nálitků je mnoho, každá společnost se zaměřuje na jiné druhy obalů. Mezi nejznámější výrobce a dodavatele v ČR patří FOSECO ČESKÁ, s. r. o., FAPROSID, s. r. l., Hüttenes-Albertus CZ, s. r. o. a SEEIF Ceramic, a. s. Výrobci dodávají obaly ze svých katalogů obvykle na základě modulu, objemu, tvaru atd. [14, 15, 19, 20]. Standardně se vyrábí obaly nálitku s tepelným modulem 1 až 4. Dodavatel Huettenes Albertus [20] uvádí tepelný modul až 8,6. Velikosti tvarových obalů jsou od desítek  $\text{cm}^3$  po stovky  $\text{dm}^3$ . [14, 15, 19, 20]

Obzvláště pro větší nálitky, kde by bylo složité formovat velký nálitek a pro menší kusovitost, jsou použity skládané obklady. Ty se dělí podle [15] na plátky, knihy, kruhové otevřené obaly nálitků a klíny, viz **obr. 22**. Požadovaný tvar se skládá z jednotlivých dílců. Dílce zmíněných tvarů bývají většinou izolační. [15]

Výrobci se liší v označení i v parametrech výrobků. Někteří výrobci uvádějí jako rozlišovací funkční parametr izolačních obalů izolační koeficient, jiní uvádějí modul. Používají se materiály s nízkou hustotou ( $600$  až  $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Výhodou je možnost složit téměř libovolný tvar a v určitém rozsahu variabilita velikosti izolačního efektu. Nevýhodou je delší doba formování. V některých případech se používají i dvouvrstvé obklady, kdy jedna vrstva, dotýkající se kovu, chrání druhou izolační vrstvu a vytváří dobrou kvalitu povrchu odlitku. Druhá vrstva má nižší hustotu a jejím úkolem je izolovat. Velikost dílců je podle [15] v největším rozměru (výška)  $200$  až  $300 \text{ mm}$ , druhý rozměr (délka) je zhruba poloviční a třetí (šířka) je řádově v desítkách milimetrů. To neplatí pro kruhové otevřené obaly nálitků (**obr. 22** úplně vpravo), ty jsou výrazně menší. Je možné poskládat více otevřených obalů na sebe nebo použít jediný. [14, 15, 19]



Obr. 22 Tvary skládaných obkladů [15].

Dále se skládané obaly nálitků používají i pro menší exotermické nálitky, toto využití je spíše pro speciální výrobu, např. pro vysoké tepelné moduly u společnosti Foseco [19] až 6,9 cm [15, 19].

Pro obaly nálitků se používají i měkké materiály, tzv. rohože (**obr. 23**) z keramických vláken na bázi SiO<sub>2</sub> (konkrétně např. z vlny z křemičitanů alkalických zemin, jak uvádí literatura [21]). Rohože se používají v místech, kde dochází k praskání tvarovek (např. kvůli tepelným šokům), pro těsnění, pro ochranu pracovníků ve slévárně (tepelné štíty), dodatečnou izolaci tvarovek (na exotermický obal) nebo na izolaci skořepinových forem. [21]



Obr. 23 Rohož [21].

## 2.4 Využití nálitku

Využití nálitku naznačuje, jestli byla při odlévání zvolena vhodná velikost nálitku. Při příliš malé velikosti nálitku mohou vznikat staženiny zasahující až do odlitku. V případě nadměrné velikosti nálitku dochází naopak k nižšímu využití nálitku, a tím k vyšším výrobním nákladům. Snaha je tedy použít nejmenší možný nálitek zvoleného typu, který s co největším využitím zaručí eliminaci staženin a ředin.

Využití nálitku lze hodnotit dvěma kritérii, a to v první řadě poměrem objemu staženiny nálitku vůči objemu celého nálitku (objem dutiny obalu nálitku, tedy ztuhlý kov i staženiny) podle vzorce:

$$\eta_N = \frac{V_S}{V_N} \quad (5)$$

kde

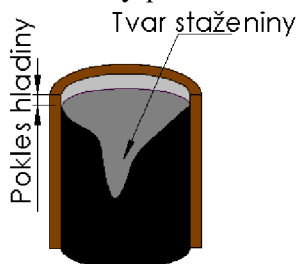
$\eta_N$  je využití nálitku [%],

$V_S$  je objem staženiny [cm<sup>3</sup>],

$V_N$  je objem nálitku (objem dutiny obalu nálitku) [cm<sup>3</sup>] [3].

Využití nálitku bývá obvykle v rozsahu 20–70 % v závislosti zejména na použitém obalu nálitku (viz **tab. 2**). Dalším vlivem na využití může být, jak bylo zmíněno, např. umístění nálitku (viz podkapitola 2.2). [10, 14]

V druhé řadě je možné hodnotit tvar vzniklé staženiny. Staženina je tvořena poklesem hladiny a dále zpravidla členitě makrostaženiny přibližně ve tvaru „V“ (viz **obr. 24**).



Obr. 24 Využití nálitku.



Kromě typu nálitku podstatně ovlivňuje využití nálitku tvar odlitku. Tenkostěnný odlitek tuhne rychleji než tlustostěnný, a tím dochází dříve k zásobování kovu z nálitku (snížení hladiny kovu). U tlustostěnných odlitků dochází ke stahování a ztuhnutí později, náletek už bývá ze stran zčásti ztuhlý, díky tomu vznikne v nálitku hlubší staženina na úkor poklesu hladiny. [3]

Pro efektivnější využívání a rozlišování nálitků byl stanoven již zmíněný modul (geometrický). S vývojem izolačních a exotermických materiálů bylo třeba zohlednit tyto tepelné vlivy na využití kovu i na dobu tuhnutí. Proto vznikl pojem „faktor posunutí modulu nálitku“, který je vyjádřen vztahem:

$$f = \frac{\sqrt{\tau_{izo,exo}}}{\sqrt{\tau_{př}}} \quad (6)$$

kde

$f$  je faktor posunutí modulu [-],

$\tau_{izo,exo}$  je doba tuhnutí exotermického nebo izotermického nálitku,

$\tau_{př}$  je doba tuhnutí přirozeného nálitku.

Při zavedení faktoru posunutí vznikl i termín tepelný modul, který je charakterizován vztahem [10]:

$$M_t = M \cdot f \quad (7)$$

kde

$M_t$  je tepelný modul [cm].

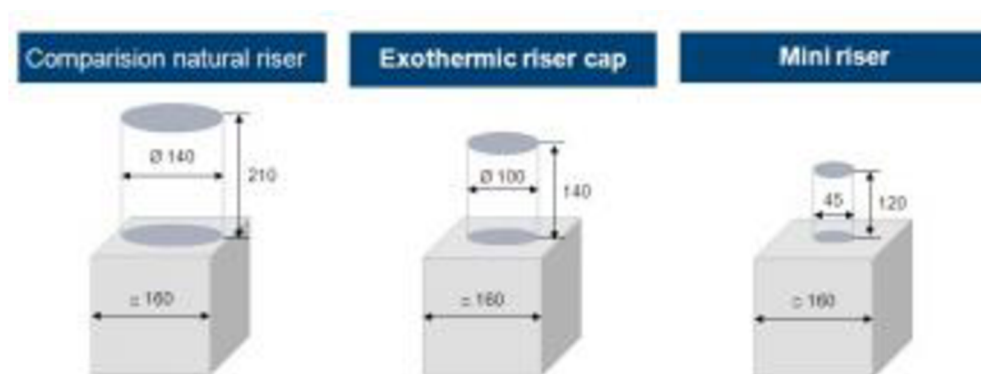
Faktor posunutí byl původně zjišťován měřením doby tuhnutí přirozeného nálitku a exotermického nálitku. Přirozený náletek se zvětšoval (tím rostl i modul) až do doby, kdy ztuhly oba nálitky za stejnou dobu. Když měl např. přirozený náletek dvojnásobný geometrický modul, byl exotermickému nálitku přiřazen faktor posunutí 2. Tepelný modul by měl hodnotu jako přirozený (tedy v tomto příkladu 2x větší než geometrický). [10]

Literatura [10] uvádí, že izotermické materiály mají nižší faktor posunutí. Toto tvrzení podporuje i výrobce FAPROSID, s. r. l., viz následující **tab. 1** (v tabulce je použit exotermický obal z experimentu a k němu stejně označený izotermický obal). [10, 14]

Tab. 1 Porovnání tepelného modulu u izotermického a exotermického nálitku [14].

Druh nálitku	Označení	Geometrický modul [cm]	Tepelný modul [cm]
Exotermický	P69I	1,05	1,73
Izotermický	P69I	1,05	1,50

Pro efektivní využití kovu je důležitá volba typu nálitku. Na **obr. 25** jde uveden příklad možné spotřeby tekutého kovu pomocí mini-nálitku. V tomto příkladě je použit odlitek o hmotnosti 28,7 kg. Při použití mini-nálitku se oproti přirozenému nálitku sníží hmotnost o zhruba 20 kg. Dále mini-náletek vzhledem k běžnému exotermickému nálitku sníží spotřebu kovu o 7 kg. U mini-nálitku je důležité brát vždy také v úvahu objemovou dostatečnost nálitku. [10]



Čistý odlitek 28,7 kg, přirozený nálietek 23 kg, exotermický nálietek 8,4 kg, mini-nálietek 1,3 kg.

Obr. 25 Porovnání přirozeného, exotermického a mini-nálitku [10].

V **tab. 2** jsou porovnány typy nálitků vzhledem k jejich objemovému využití. V posledním sloupci jsou uvedena místa, ve kterých se nálitky nejčastěji používají. Nálitky je však možné použít i jiným způsobem, než je uvedeno v **tab. 2**.

Tab. 2 Porovnání různých typů nálitků [10, 14].

Nálietek	Max. využití nálitku [%]	Použití
Přirozený	10–20	Všechny typy odlitků
Izotermický	60	Velké a střední nálitky
Exotermický	50–55	Malé nálitky
Mini-nálietek	70	Strojní linky

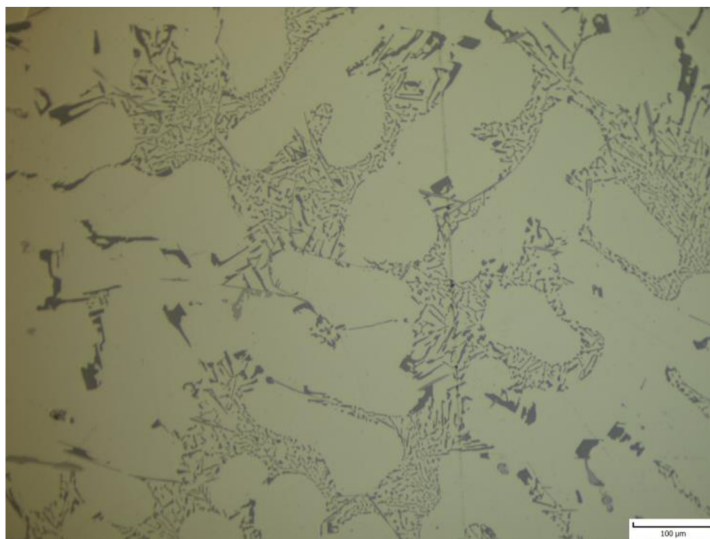
Jak již bylo uvedeno, každá slitina jinak stahuje. Proto i materiál má vliv na nálitkování. Např. pro litinu se oproti oceli používají menší nálitky, díky menší změně objemu při tuhnutí.

### 3 MATERIÁL DIN 226

Použitý materiál pro experiment prováděný v rámci bakalářské práce byl materiál dle DIN 226 s chemickým značením AlSi9Cu3. Jedná se o silumin s přísadou mědi. Použití je zejména pro nepropustné součásti, jako jsou karburátory a armatury benzínových motorů. Slitina je vhodná pro tlakové lití hmotnějších odlitků, ale dá se použít i pro střední a drobné odlitky. Jak uvádí literatura [5], výhodou skupiny siluminů s přísadou mědi je, že netvoří soustředěné staženiny. Dále mají nízký sklon k tvorbě trhlin za tepla, málo pohlcují plyny a jsou dobře obrobitelné. [5]

Křemík ve slitině zlepšuje slévárenské vlastnosti, jako je zabíhavost, tepelná roztažnost, odolnost proti otěru, stahování během tuhnutí, vznikání trhlin a prasklin atd. Hliníkové slitiny mají obecně dobrou odolnost proti korozi. Ve slitině DIN 226 je korozní odolnost kladně ovlivněna křemíkem a negativně příměsí mědi. Literatura [22] popisuje, že měď v siluminech rozšiřuje interval tuhnutí, a tím zvyšuje sklon k vzniku trhlin a ředin za tepla. Měď dále zvyšuje pevnost a tvrdost. Na rozdíl od křemíku měď zlepšuje obrobitelnost. [5, 22]

Na **obr. 26** je znázorněna struktura materiálu. Je zde možné vidět dendrity alfa fáze a eutektikum.



Obr. 26 Struktura materiálu DIN 226.

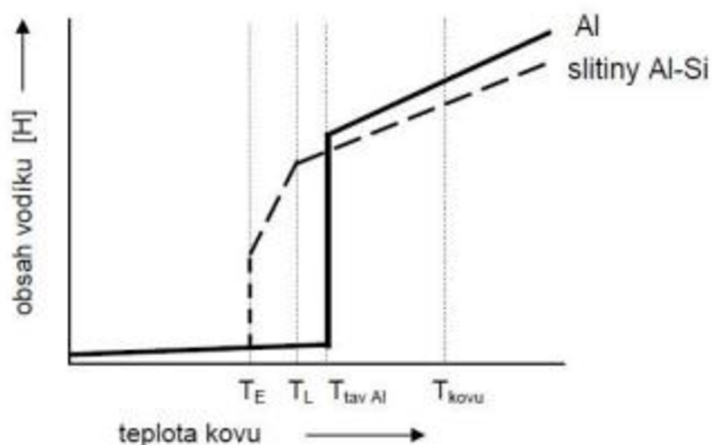
#### 3.1 Vady odlitků ze slitin hliníku

Dva hlavní problémy při odlévání slitin hliníku jsou podle literatury [22, 23] tvorba vměstků a porezita. Vměstky jsou nečistoty v ztuhlém odlitku a mají negativní vliv na vlastnosti materiálu. Ovlivněné vlastnosti jsou zejména obrobitelnost, těsnost, pevnost, zabíhavost a další. Nečistotami mohou být kousky vyzdívky pece nebo kelímku, oddělené částice keramických filtrů, různé nežádoucí prvky a sloučeniny nebo třeba oxidické blány. Podle [22] má ze zmíněných vměstků největší vliv na vlastnosti odlitku ze slitin hliníku přítomnost oxidických blán. Oxidické blány jsou tenké vrstvy oxidu hlinitého, které vznikají při kontaktu kyslíku s kovem. Nejčastěji se vytvářejí v peci, při lití nebo v otevřeném nálitku. [5, 8, 22, 23]

Další častou vadou odlitků ze slitin hliníku je porezita. Porézní materiál obsahuje díry (póry) vzniklé přítomností plynů, zejména vodíku. Porezitu negativně ovlivňují tyto faktory:

- vysoká teplota kovu (přehřátí),
- špatné usměrnění kovu,
- nedostatečné odplynění tekutého kovu,
- vlhká či nepřehřátá forma a další [5, 23, 24].

Obecně platí, že čím je vyšší teplota, tím více v sobě kovy rozpouští plyny. Slitiny hliníku mají teplotu tavení okolo 580–620 °C. Při této teplotě mají slitiny vyšší rozpustnost vodíku oproti rozpustnosti v tuhé fázi (viz **obrázek 27**). Při ochlazování a tuhnutí začne klesat rozpustnost a vylučováním plynu z taveniny se vytvoří plynové bubliny. Vodík je v tavenině přítomen zejména kvůli vlhkosti vstupního materiálu nebo díky vlhkosti vzduchu. [21, 23, 24]



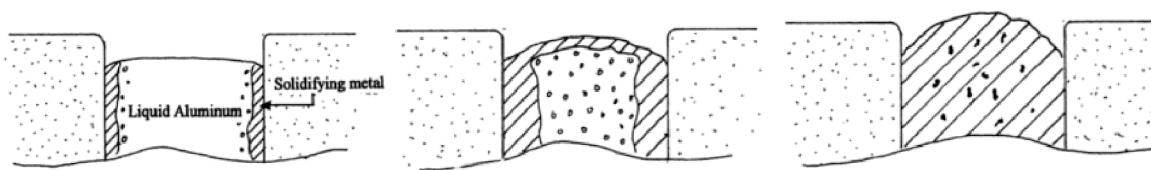
Obr. 27 Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a slitinách Al-Si [21].

Hliník má vysokou afinitu ke kyslíku, a tak při kontaktu s vodou (vlhkostí) dochází k následující reakci:



V reakci (8) je zřejmé, že při kontaktu hliníku a vody (v podobě vodní páry) je vyloučen vodík, který se rozpouští ve slitině. Kyslík se sloučí s hliníkem a na povrchu vznikne oxid hlinitý. [4, 21]

Na **obr. 28** je znázorněn postup tuhnutí kovu v otevřeném přirozeném nálitku. Na levém obrázku začíná kov tuhnout ze stran a ztuhlá část vylučuje před sebe vodík. Na prostředním obrázku pak ztuhne vrchní část nálitku. Vodík se přednostně vyloučí do pórů, které jsou znázorněny na pravém obrázku. [23]



Obr. 28 Plyn v nálitku [23].

Pro tuto práci je zajímavý vztah pórovitosti a stahování odlitku. Literatura [22] uvádí, že póry částečně nahrazují objem staženiny. Tzn. naplněný odlitek méně stahuje než odlitek s nízkým obsahem vodíku. Vzhledem k této skutečnosti je možné při určitém naplnění používat menší nálitky než v přísně odplyněném stavu. [4, 8, 22]

Naplnění je charakterizováno tzv. dichte indexem, který porovnává hustotu vzorku ztuhlého na vzduchu a v podtlaku. Dichte index (DI) je udáván vztahem [22]:

$$DI = \frac{\rho_{vz\ atm} - \rho_{vz\ vak}}{\rho_{vz\ atm}} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

kde

$\rho_{vz\ atm}$  je hustota vzorku ztuhlého na vzduchu (v atmosférickém tlaku) [ $g \cdot cm^3$ ],

$\rho_{vz\ vak}$  je hustota vzorku ztuhlého ve vakuu [ $g \cdot cm^3$ ].

Hustoty obou vzorků  $\rho_{vz}$  se stanovily podle vzorce [22]:

$$\rho_{vz} = \frac{m_{vz\ at}}{m_{vz\ at} - m_{vz\ H_2O}} \cdot \rho_{H_2O} \quad (10)$$

kde

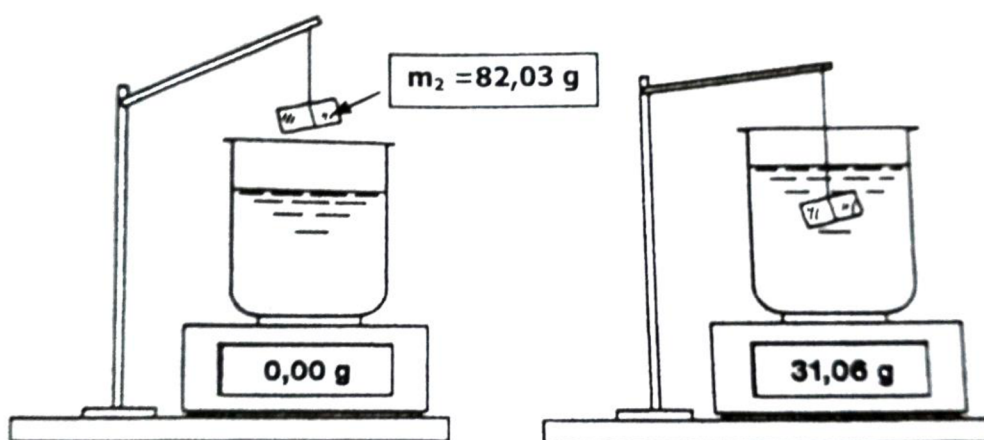
$m_{vz\ at}$  je hmotnost vzorku na vzduchu [g],

$m_{vz\ H_2O}$  je hmotnost vzorku ve vodě [g],

$\rho_{vz}$  je hustota vzorku [ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ],

$\rho_{H_2O}$  je hustota vody [ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ].

Dvojitý vážení funguje na principu Archimédova zákona. Vzorek ponořený do kapaliny je nadnášen silou, která je rovna hmotnosti kapaliny, kterou těleso při ponoření vytlačí. Na **obr. 29** je znázorněn příklad metody vážení. [22]



Obr. 29 Metoda dvojitého vážení [21].

Pro eliminaci zmíněných vad se často vstupní materiál čistí, odmašťuje, předehřívá a následně v peci odplyňuje (zejména vodík) na požadovanou hladinu. Pro odstranění vměstků se používají filtry. [22, 23, 24]

Odplynění se provádí obvykle vháněním inertního plynu do taveniny. Použitý plyn bývá dusík, argon nebo směs dusíku s freonem, fluorem nebo chlorem. Odplyňovací přístroj vytváří drobné bublinky, které rozptýlí po celém objemu kovu. [22, 23, 24]

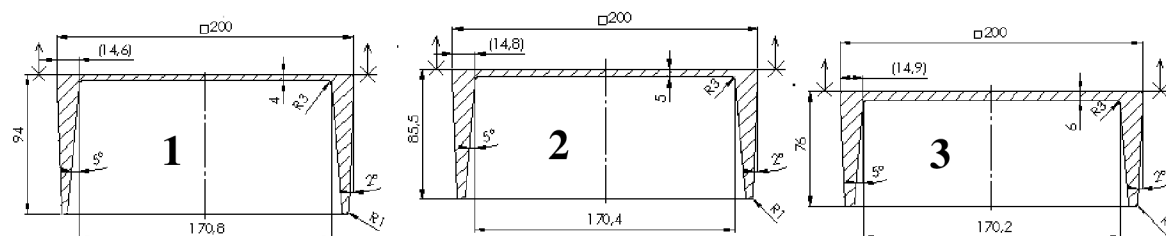
Pórovitost ve slitinách hliníku je v důsledku jejich tuhnutí vždy. Naplynění je obecně bráno jako nežádoucí, ale do určité velikosti je vhodné. U vysoce odplyněného odlitku mají řediny nepravidelný ostrý tvar, který může iniciovat trhlinu. Při určitém naplynění dojde ke změně tvaru z nepravidelného na kulový. Kulový tvar je z hlediska mechanických vlastností výhodnější. V odlitku je tedy snaha zajistit naplynění v určitém rozsahu. [25]

## 4 EXPERIMENT

Cílem experimentu bylo ověření vlivu tvaru odlitku na využití exotermického nálitku. Změnou tvaru odlitku (viz **obr. 31**) byla měněna rychlost tuhnutí kovu v jednotlivých zkušebních odlitcích, což by mělo mít vliv na využití nálitku. Využití nálitku je možné hodnotit několika způsoby, jako je posouzení tvaru staženiny v nálitku, porovnání poklesu hladiny kovu v nálitku nebo posouzení pórovitosti v jednotlivých odlitcích a nálitcích. Následující podkapitoly se zabývají řešením a vyhodnocením zadaného experimentu.

### 4.1 Návrh geometrického tvaru odlitku

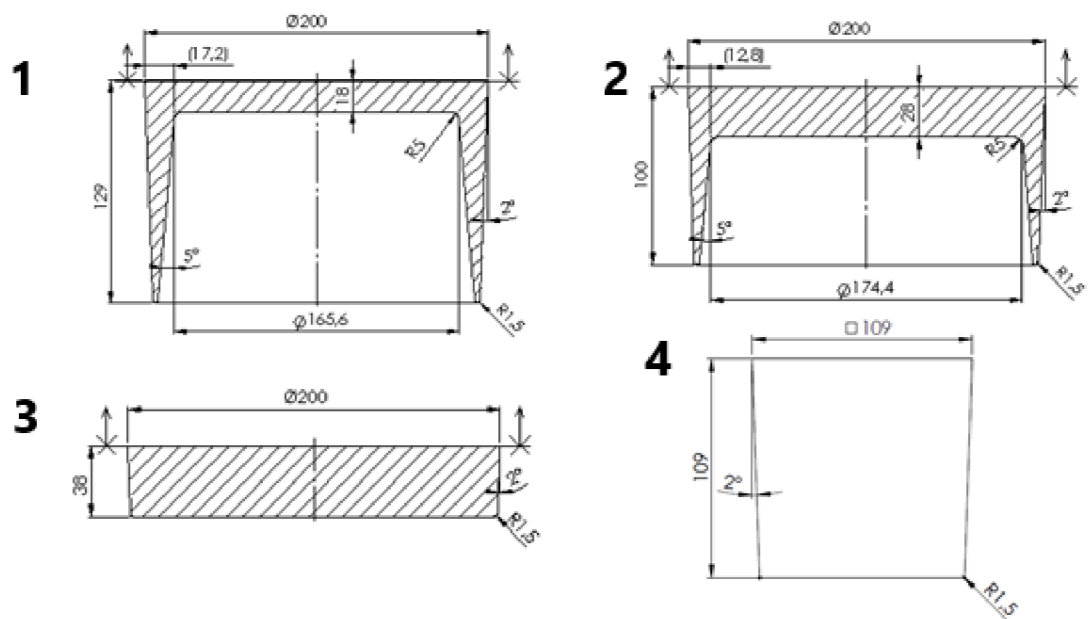
Na začátku experimentu bylo třeba stanovit tvar a rozměry zkušebních odlitků. V prvním kroku byl navržen čtvercový průřez odlitků ve třech variantách, viz **obr. 30** (nálitky by byly umístěny do středu odlitku). Tento návrh byl pro experiment nevhodný zejména proto, že tvar odlitku by při tuhnutí nezajišťoval usměrňenost tuhnutí kovu v odlitku. Dále byl upraven i tvar odlitku ze čtvercového na kruhový. Úloha se tedy stala symetrickou, což zaručuje ve všech směrech stejné podmínky tuhnutí kovu a eliminuje při smrštění kovu nerovnoměrnou deformaci čtvercového průřezu odlitku.



Obr. 30 První návrh geometrií odlitků.

Pro vlastní experiment byl tedy nakonec volen druhý návrh, který lépe splňuje konstrukční i technologické parametry. Druhý návrh geometrií odlitků zajišťuje usměrňenost tuhnutí odlitku, eliminuje nerovnoměrnou deformaci, zajišťuje snadnější vyrobiteľnosť modelů a lepší průkaznost změny využití nálitku. Byly navrženy tři různé rotační geometrie odlitků. Následně se přidala čtvrtá geometrie ve tvaru krychle se zkosením a rádiusy (dále jen krychle). Jednotlivé použité geometrické varianty tvaru odlitků jsou označeny čísly 1 až 4 a jsou uvedeny na **obr. 31**. Výrobní výkresy odlitků jsou uvedeny v příloze. Všechny čtyři varianty měly shodný objem  $1,2 \text{ dm}^3$  a pro každou variantu byl použit exotermický náletek P69I (viz příloha 2) umístěný do vršku formy do geometrické a zároveň tepelné osy odlitku.

Náletek P69I patří do skupiny obalů ISO EXO 26–28. Tato skupina je výrobcem určena primárně pro legované oceli a litinu s kuličkovým grafitem. Je však možné obaly použít i pro odlitky ze slitin hliníku. Obal má dobrou izolační schopnost a zároveň díky exotermické reakci uvolňuje do kovu v nálitku množství tepla. Maximální využití nálitku je 50–55 %. Obal je doporučen pro odlitky s krátkou dobou tuhnutí. [14]

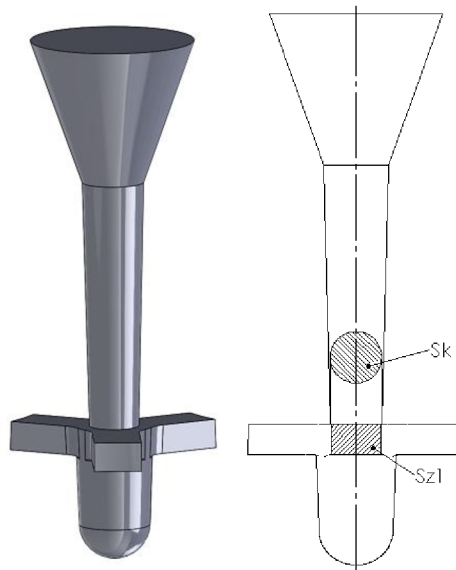


Obr. 31 Posuzované čtyři geometrie odlitků.

## 4. 2 Návrh vtokové soustavy pro odlitek

Další fází experimentu bylo navrhnout vtokovou soustavu. Pro experiment byla zvolena přetlaková vtoková soustava, která je charakteristická řídicím průřezem zářezů. Tím se zajišťuje rychlejší plnění a také zabráňuje nasávání plynů. Nevýhodou může být horší jakost odlitku způsobená turbulentním prouděním kovu ze zářezů do odlitku.

V první tavbě se odlévaly 3 geometrie odlitku. Následně byla přidána 4. geometrie a proběhla druhá tavba (viz podkapitola 4.4). Aby byly zajištěny stejné teplotní a časové podmínky, byly 3 geometrie napojeny po 120° na centrální vtokovou soustavu (viz obr. 32). V této vtokové soustavě je rozváděcí kanál nahrazen dopadovou jamkou.



Obr. 32 Vtoková soustava.

Rychlost proudění kovu je závislá podle literatury [4] na nejvyšší výšce hladiny kovu ve vtokové soustavě  $H$  a na součiniteli celkového odporu vtokové soustavy  $\mu_{vts}$ , ten byl pro podmínky experimentu zvolen 0,6 [4].

Teoretická rychlost tečení kovu  $v_d$  se vypočítá ze vztahu:

$$v_d = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,19} = 1,93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11)$$

Skutečná rychlost tečení kovu  $v_s$

$$v_s = \mu_{vs} \cdot v_d = 0,6 \cdot 1,93 = 1,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12)$$

Což odpovídá  $116 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pro další výpočty byla vzhledem k jednotce modulu použita délková jednotka cm. Pro vyjádření plochy zářezů je možné použít vzorec pro objem (V):

$$V = v_s \cdot S_z \cdot \tau = \frac{m_s}{\rho} \quad (13)$$

kde

$S_z$  je průřez zářezů [ $\text{cm}^2$ ],

$\tau$  je doba lití (10 s),

$m_s$  je hmotnost surového odlitku (11,15 kg) – všech tří geometrií a s vtokovou soustavou,

$\rho$  je hustota slitiny  $0,00265 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Průřez zářezů  $S_z$ :

$$S_z = \frac{m}{\rho \cdot v_s \cdot \tau} = \frac{11,15}{0,00265 \cdot 116 \cdot 10} = 3,63 \text{ cm}^2 \quad (14)$$

$S_z$  je průřez všech zářezů.

Průřez jednoho zářezu  $S_{z1}$  se stanoví na základě počtu zářezů vztahem:

$$S_{z1} = \frac{S_z}{3} = \frac{3,63}{3} = 1,21 \text{ cm}^2 \quad (15)$$

Pro zvolené podmínky by měl být průřez jednoho zářezu alespoň  $1,2 \text{ cm}^2$ . Pro experiment byla zvolena větší, již vyrobená vtoková soustava s průřezem jednoho vtoku  $2,3 \times 1,4 \text{ cm}$ , což odpovídá ploše zářezu  $3,22 \text{ cm}^2$ . Vtoková soustava by byla vhodnější spíše pro větší odlitky. V experimentu byla doba prvního lití prvního odlitku 20 sekund a doba lití druhého cca 30 sekund. Díky pomalejšímu lití došlo k omezení turbulencí. V tenkých průřezích některých odlitků docházelo již v průběhu odlévání k natuhnutí.

Vtoková soustava byla volena z poměru:

$$S_z : S_k = 1 : 1,4 \quad (16)$$

Nejmenší průřez vtokového kůlu  $S_k$ :

$$S_k = 1,4 \cdot S_z = 1,4 \cdot 3,22 = 4,51 \text{ cm}^2 \quad (17)$$

Nejmenší průměr vtokového kůlu  $d$ :

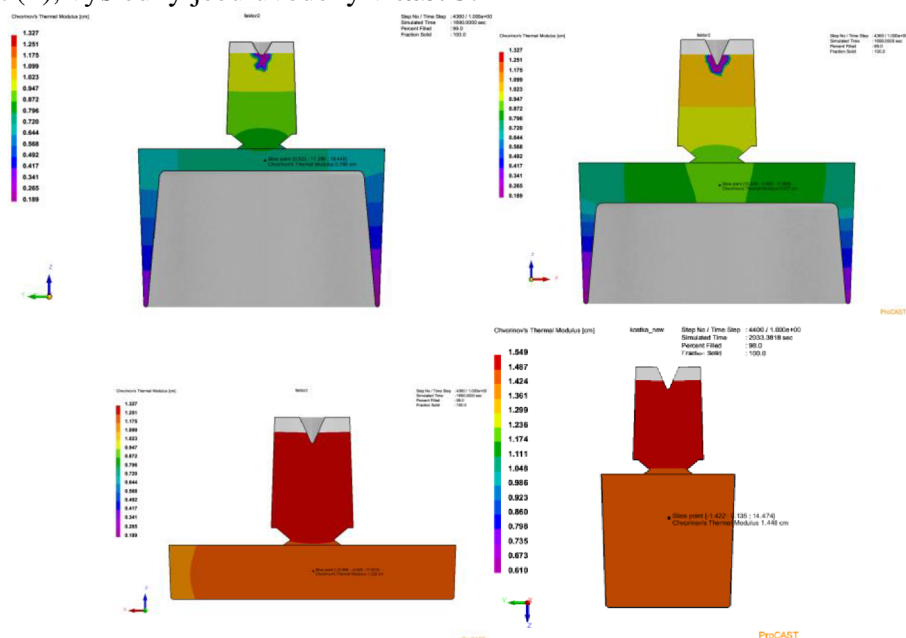
$$d = \frac{4 \cdot S_k}{\pi} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,51}{\pi}} = 2,40 \text{ cm} \quad (18)$$

Nejmenší průměr vtokového kůlu byl zvolen 24 mm.



### 4.3 Modul a tvarový faktor

Třetím krokem experimentu byl výpočet modulů odlitků  $M$  a tvarových faktorů  $q$ . Povrch byl vypočítán z modelu součástí za pomoci programu Solidworks. Výpočet proběhl dle vztahů (1) a (2), výsledky jsou uvedeny v **tab. 3**.



Obr. 33 Tepelné moduly v určitých místech odlitku

Na **obr. 33** jsou znázorněny tepelné moduly v odlitcích a nálitcích stanovených simulačním programem ProCAST. Z obrázků je patrné, že geometrie 3 a 4 mají značně větší modul než geometrie 1 a 2. Jak již bylo uvedeno, modul souvisí s dobou tuhnutí, proto lze z modulů očekávat průběh tuhnutí. Odlitek 3. a 4. má přibližně stejný modul v celém objemu, zatímco 1. a 2. odlitek má rozdílné hodnoty začínající od modulu 0,19 na konci žebra. Konkrétní hodnoty modulů v tepelné ose a na kraji odlitku jsou uvedeny a porovnány s vypočtenými moduly v **tab. 3**.

Tab. 3 Parametry odlitků.

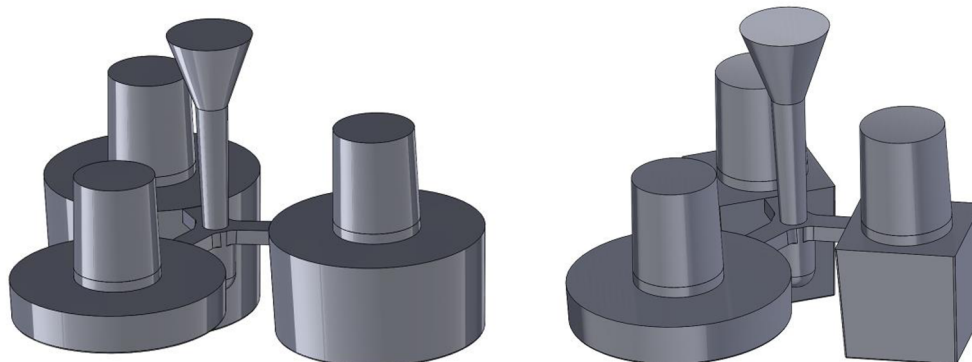
Tvar	Objem $V$ [cm <sup>3</sup> ]	Otevřený povrch $S$ [cm <sup>2</sup> ]	Modul $M$ [cm]			Tvarový faktor $q$ [-]
			Vypočtený	Simulace střed	Simulace kraj	
1	1200	1928	0,62	0,79	0,19	4977
2	1200	1576	0,76	0,88	0,19	2720
3	1200	829	1,45	1,22	1,10	396
4	1200	621	1,93	1,45	1,42	166

Z **tab. 3** je zřejmé, že v podnálitkové části odlitku je modul podobný vypočtenému modulu odlitků. Odchylna je dána nepřesným zadáváním parametrů materiálu.

Aby staženina z nálitku nezasahovala do odlitku, je třeba, aby modul nálitku byl větší než modul odlitku. Zvolený nálitek P69I má geometrický modul 1,05 cm (viz příloha 2), což by vyhovovalo pro 1. a 2. odlitek, ale ne pro 3. a 4. odlitek. Jak bylo uvedeno v podkapitole 2.4, nezáleží jen na geometrickém modulu nálitku, ale hlavně na tepelném modulu. Tepelný modul nálitku byl 1,73, což je stále menší než modul 4. varianty. Při pominutí okolních vlivů (jako je např. naplynění) je nálitek z hlediska modulu vyhovující pro první tři geometrie a pro 4. geometrii z hlediska modulu nevyhovuje. U 4. geometrie se očekávalo několik možných vad, jako jsou řediny, staženina z nálitku zasahující až do odlitku nebo staženina vytvořená uprostřed odlitku krychle (výsledky v podkapitole 4.5).

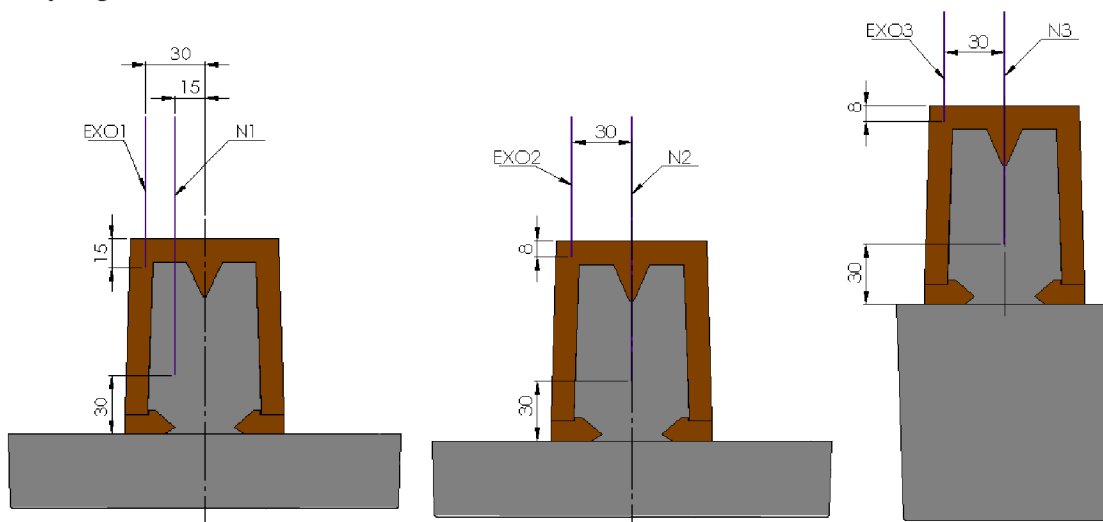
## 4.4 Popis experimentu

Na základě návrhu z podkapitol 4.1, 4.2 a 4.3. byly sestaveny dva zkušební odlitky. Na **obr. 34** jsou znázorněny modely sestav pro všechny čtyři tvary zkušebních odlitků s nálitky napojené na vtokovou soustavu. Odlitek vlevo byl odlit v první tavbě, odlitek vpravo ve druhé.



Obr. 34 Surové odlitky s obaly nálitků.

Podle výkresů modelů byly zhotoveny dřevěné modely. Modely byly zaformovány spolu s obklady nálitků P69I. Do nálitku byly umístěny termočlánky (viz **obr. 35**). V první tavbě byl jeden termočlánek umístěn do obalu nálitku (EXO1) a druhý do nálitku 15 mm od geometrické osy odlitku (N1). Ve druhé tavbě byly dva termočlánky (N2 a EXO2) obdobně umístěny v nálitku 3. geometrie odlitku (**obr. 34** uprostřed) a další dva termočlánky (N3 a EXO3) byly umístěny v nálitku 4. geometrie odlitku (**obr. 35** vpravo). Termočlánky EXO2 a EXO3 byly umístěny opět v obalu nálitku. Termočlánky N2 a N3 byly kvůli názornějšímu průběhu umístěny do osy nálitku. Hodnoty naměřené v termočláncích jsou později souhrnně uvedeny v grafu (viz **obr. 37**).



Obr. 35 Poloha termočlánků.

K výrobě forem byla použita samotuhnoucí formovací směs. Jako ostřivo byl použit křemičitý písek. Pojivo bylo na bázi geopolymery s obchodním názvem Geopol. Příprava směsi probíhala na průběžném mísiči. Po 20 minutách od zaformování byly modely vyjmuty. Tavení kovu probíhalo na odporové peci. Vsázku tvořilo cca 12 kg kovu hliníkové slitiny dle DIN 226.

Před litím byl v tavenině změřen dichte index. Na **obr. 36** vlevo je vyfocen vakuový přístroj. Speciální laboratorní váha pro měření hmotností a stanovení hustoty vzorku je

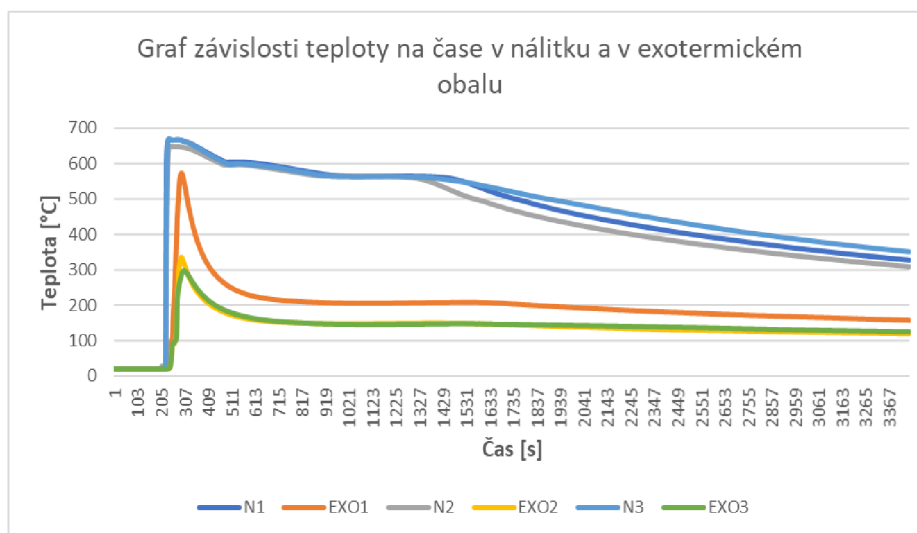
zachycena na **obr. 36** vpravo. Po dvojitým vážení (na vzduchu a ve vodě) se pomocí laboratorní váhy stanovily hustoty vzorků, ze kterých byl podle vzorce (9) stanoven dichte index. Laboratorní váha byla použita i pro měření hustoty vzorků ve střední a krajní části odlitku (viz podkapitola 4.5).



Obr. 36 Vakuový přístroj a laboratorní váha.

Změřená hodnota dichte indexu byla při prvním lití 10,94, což odpovídá kovu s vyšším naplyněním. Při druhém lití byla změřena hodnota dichte indexu 8,75. Nižší hodnota dichte indexu byla ovlivněna tím, že část vsázky (asi 50 %) tvořil vratný materiál (stále DIN 226). Lící teplota byla v prvním i druhém lití 727 °C. Kov byl odlit ručně z pánve přes hubičku do předpřipravené formy. Doba lití byla v prvním lití 20 sekund a ve druhém 30 sekund.

Průběh tuhnutí je možné vidět na následujícím grafu (**obr. 37**), kde N1, N2 a N3 značí teplotu kovu v nálitcích. Křivky označené EXO1, EXO2 a EXO3 značí teplotu v exotermickém obalu. Hodnoty pro graf byly zaznamenávány pomocí plášťového termočlánku typu K a počítačového programu pDaqView.



Obr. 37 Graf tuhnutí odlitků.

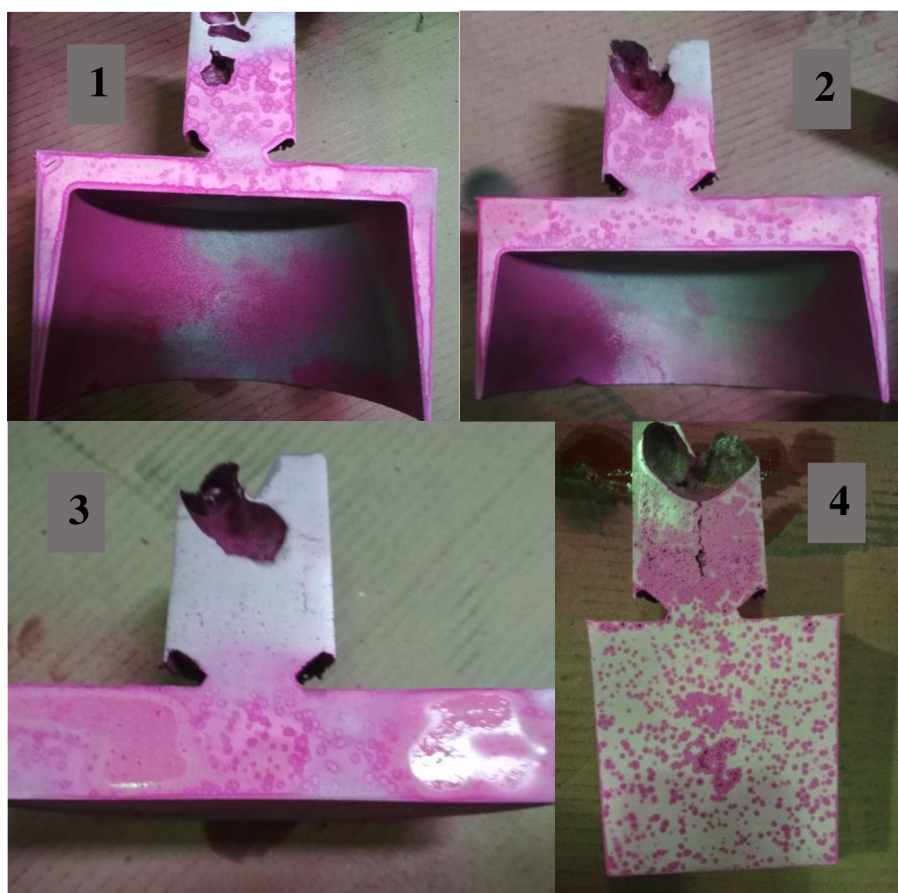
V grafu je možné vidět, že se nálitky nezapálily, protože křivky EXO1, EXO2 ani EXO3 neměly vyšší teplotu než křivky N1, N2 a N3. Aby se dalo s určitostí říci, že se nálitky zapálily, musela by být teplota obalu vyšší než teplota kovu. Nálitky tedy plnily funkci izolačních nálitků. EXO2 a EXO3 mají v grafu nižší teplotu, zřejmě proto, že byly umístěny výše v nálitku než EXO 1 (viz **obr. 35**).

Po ztuhnutí odlitku byl odlitek uvolněn na vibračním roštu. Surový odlitek byl očištěn pískováním od zbytků formovací směsi. Následně byla úhlovou bruskou odstraněna vtoková soustava.

## 4.5 Vyhodnocování experimentu

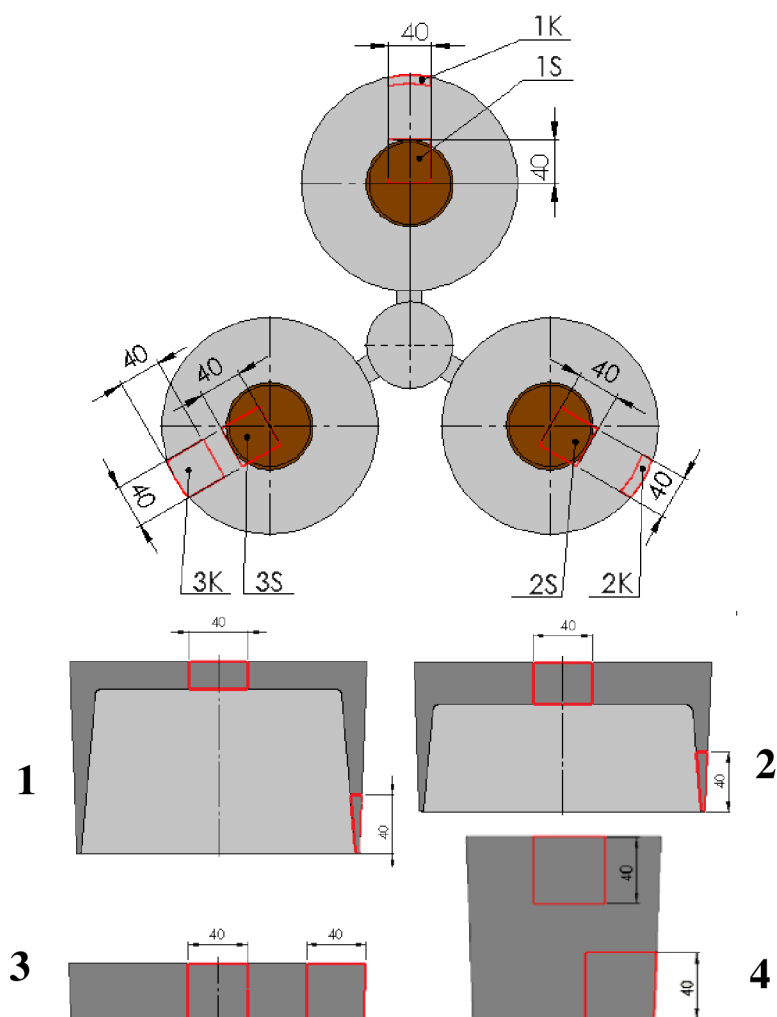
Jednotlivé odlitky byly rozříznuty na pásové pile kolmo na Williamsovo jádérko v nálitcích. Jedna polovina každého odlitku byla použita pro kapilární zkoušku. Povrch po řezu byl broušen a očištěn acetonem.

Na broušené plochy se naněsł penetrant. Po asi hodině se barva setřela a naněsł se vývojka. Penetrant zachycený v pórech začal okamžitě vzlínat. Na **obr. 38** je zachycen průběh kapilární zkoušky, několik sekund po naněslení vývojky. Okamžité vzlínání ukazuje na to, že se póry vyskytují jak v nálitku, tak i v celém odlitku a že byly póry relativně velké. Největší množství pórů je na odlitcích s geometrií 3 a 4. S klesající tloušťkou stěny, tj. u odlitků s žebry (odlitky 1 a 2), se množství pórů zmenšovalo, v žebrech se objevilo jen několik pórů, což je dáno výrazně rychlejším tuhnutím. Vyšší pórovitost byla dána vyšším naplyněním kovu.



Obr. 38 Kapilární zkouška.

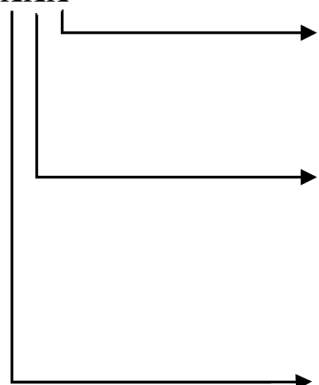
Druhá polovina každého odlitku byla dále řezána. Z vybraných míst byly odebrány vzorky pro porovnání hustoty v podnálitkové oblasti a ve spodní oblasti žebra. Na **obr. 39** je znázorněno umístění odebraných vzorků, jejich označení a přibližná velikost vzorku. Barevně (hnědá) jsou v nárysu naznačena umístění nálitků.



Obr. 39 Umístění vzorků.

Označení odebraných vzorků bylo provedeno na základě následujícího schématu.

XXX



**Umístění na odlitku:**

S – střední část odlitku (podnálitková oblast)

K – krajní část odlitku (spodní oblast žebra)

**Číslo odlitku:**

1 – první geometrická varianta

2 – druhá geometrická varianta

3 – třetí geometrická varianta

4 – čtvrtá geometrická varianta

**Tavba**

I – první tavba

II – druhá tavba

Vzhledem k tomu, že ve druhé tavbě byly dva odlitky 4 geometrické varianty (krychle), budou tyto dva odlitky dále odlišeny pomlčkou a písmeny A a B.

Odřezané vzorky byly použity pro porovnání hustot. Vzorky byly zváženy nejprve na vzduchu a potom ve vodě (metoda dvojího vážení viz podkapitola 3.1). Hustota byla spočítána laboratorní vahou podle vzorce (10). Hodnoty hustoty materiálu krajové a středové (podnálitkové) části odlitku jsou zaznamenány v následující **tab. 4**.

Tab. 4 Hustota materiálu ve středu a na kraji odlitku.

Označení místa odběru	Hmotnost na vzduchu [g]	Hmotnost ve vodě [g]	Hustota materiálu [g·cm <sup>3</sup> ]	Rozdíl hustot [g·cm <sup>3</sup> ]
I1S	75,36	47,00	2,65	0,00
I1K	22,58	14,08	2,65	
I2S	108,81	67,63	2,64	0,02
I2K	18,62	11,62	2,66	
I3S	121,12	75,30	2,64	0,01
I3K	103,90	64,81	2,65	
II3S	148,92	92,85	2,65	0,01
II3K	140,99	88,16	2,66	
II4S-A	144,34	88,67	2,59	0,07
II4K-A	172,36	107,65	2,66	
II4S-B	166,06	102,50	2,61	0,05
II4K-B	155,13	96,90	2,66	

Z posledního sloupce **tab. 4** je zřejmé, že se u 1.–3. geometrie neprojevila výrazná změna hustoty v odlitku. U čtvrté geometrie je změna výraznější. Rozdíl je způsoben rozdílnou rychlostí tuhnutí v rohu a ve středu kostky. Simulace ukazuje, že střed 4. geometrie tuhne výrazně pomaleji než roh 4. geometrie.

Všechny části odlitku použité pro měření hustoty, byly dále rozřezány na kotoučové laboratorní pile Struers. Vyřezané vzorky (spodní část z předchozích vzorků) byly zalisovány do dentacrylu (lisovací hmota) pomocí laboratorního lisu. Dále byly vzorky broušeny za mokra a leštěny diamantovou pastou.

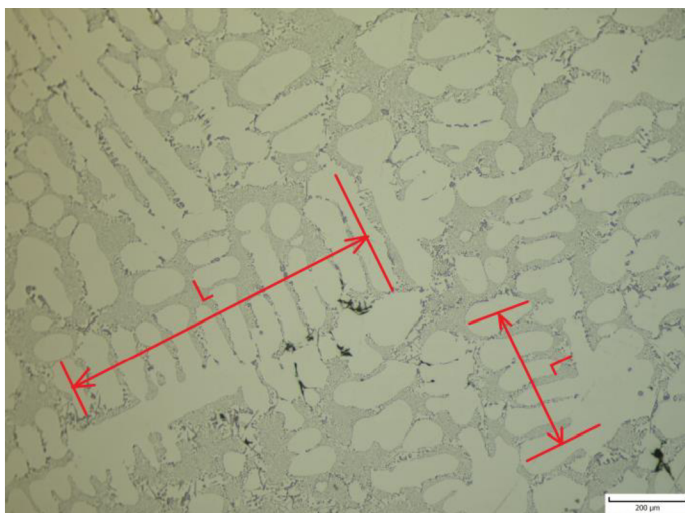
Metalografické hodnocení bylo provedeno na světelném mikroskopu Neophot 32. Snímky byly zhotoveny v programu Quick PHOTO Industrial. Na několika snímcích všech vzorků odlitků 1 až 4 byl stanoven DAS index (**obr. 39**). DAS index znázorňuje vzdálenost sekundárních os dendritů. Pro přesnější měření se změří více sekundárních os dendritů, které se podělí počtem vzdáleností mezi nimi, viz následující vztah:

$$DAS = \frac{L}{n - 1} \quad (19)$$

kde

$L$  je vzdálenost přes  $n$  dendritů,

$n$  je počet sekundárních os dendritů, přes které se měří.



Obr. 40 Měření DAS indexu.

Hodnoty DAS stanovených ze vzorků jsou v **tab. 5**.

Tab. 5 Hodnot DAS indexu.

Označení vzorku	I1S	I1K	I2S	I2K	I3S	I3K
DAS index	64,7±12,0	21,6±2,0	67,8±10,5	21,3±4,5	93,1 ±10,6	72,2±10,3
Označení vzorku	II3S	II3K	II4S-A	II4K-A	II4S-B	II4K-B
DAS index	76,9±2,4	65,1±12,4	83,1±9,0	58,8±5,6	94,8±8,3	55,0±8,3

Z **tab. 5** je možné vidět velký rozdíl DAS indexu ve vzorku z kraje oproti středu. Rozdíl je patrný zejména u vzorku 1 a 2. Z hodnot DAS je zřejmé, že žebro v odlitku 1 a 2 má významný vliv na rychlost tuhnutí. Velikost žebra není z hlediska DAS u hodnocených odlitků významná. Toto tvrzení je v souladu s numerickou simulací, která ukazuje podobnou rychlost tuhnutí žebor v odlitku 1 a 2. Kraj (žebro) má až 3x jemnější strukturu kvůli rychlejšímu tuhnutí v žebrech. Jemnější struktura je znázorněna menší vzdáleností sekundárních os dendritu. Struktura má vliv na mechanické vlastnosti, části s jemnější strukturou budou mít vyšší pevnost a menší velikost i počet pórů. Toto tvrzení potvrzuje kapilární zkouška, u které se v oblasti žebor vyskytovalo podstatně méně pórů.

Jedním z nejpodstatnějších vyhodnocení bylo vyhodnocení objemu a tvaru staženin. Z rozříznutých nálitků bylo patrné, že hladina kovu v celé ploše všech nálitků neklesla, ale vznikla většinou jedna velká soustředěná staženina umístěná kolem Williamsova jádérka. Náliček v odlitku č. I1 a II4-A obsahoval více menších staženin. V nálitku odlitku II4-A vznikla atypická staženina ve spodní části nálitku. Staženiny v jednotlivých odlitcích jsou uvedeny na **obr. 41**. V první řadě je první tavba, ve druhé řadě druhá. Nálitky jsou řazeny zleva dle modulu (I1, I2, I3, II3, II4-A, II4-B)



Obr. 41 Staženiny.

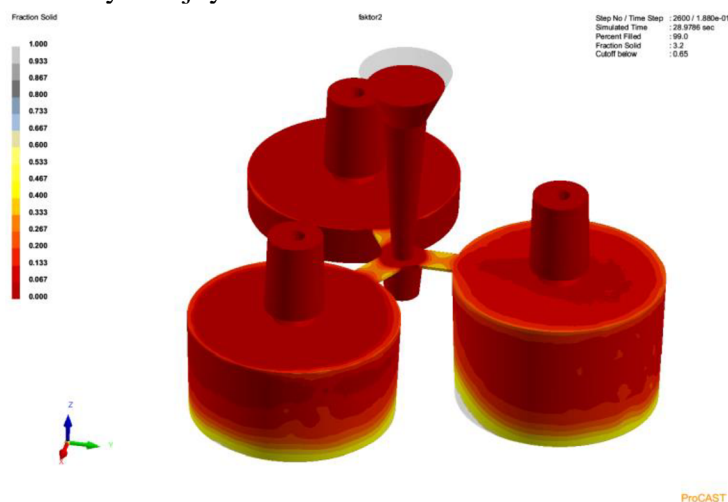
Vyhodnocení využití nálitku bylo hodnoceno změřením objemu staženin a porovnáním s celkovým objemem nálitku. Dutiny staženin byly vysypány pískem a nasypáním do odměrného válce byl určen jejich objem. Podle tvaru staženiny v řezu a tloušťky řezu byl vypočítán také odřezaný objem staženiny. Součtem objemu písku v odměrném válci a objemu odřezané staženiny byl určen celkový objem staženiny nálitku (**tab. 6**: 3. řádek). V **tab. 6** jsou znázorněny objemy potřebné k vypočítání využití nálitku. Využití nálitku se vypočítalo dle vzorce (5) a je uvedeno v poslední řádce **tab. 6**.

Tab. 6 Využití nálitku.

Číslo odlitku	I1	I2	I3	II3	II4-A	II4-B
Předepsaný objem nálitku [ml]	180	180	180	180	180	180
Objem staženiny vypočtený [ml]	16	25	32	32	45	42
Objem staženiny dle simulace [ml]	8	9	14	14	16	16
Skutečný objem kovu v nálitku [ml]	164	155	148	148	135	135
Využití nálitku [%]	8,89	13,88	17,78	17,78	25,00	23,33

Z **tab. 6** je zřejmé, že rozdíl v objemu simulací vypočtených a naměřených staženin je dán tím, že simulace nepočítala s naplyněním kovu, tj. hodnotou dichte indexu, což bylo v tomto experimentu relativně vysoké.

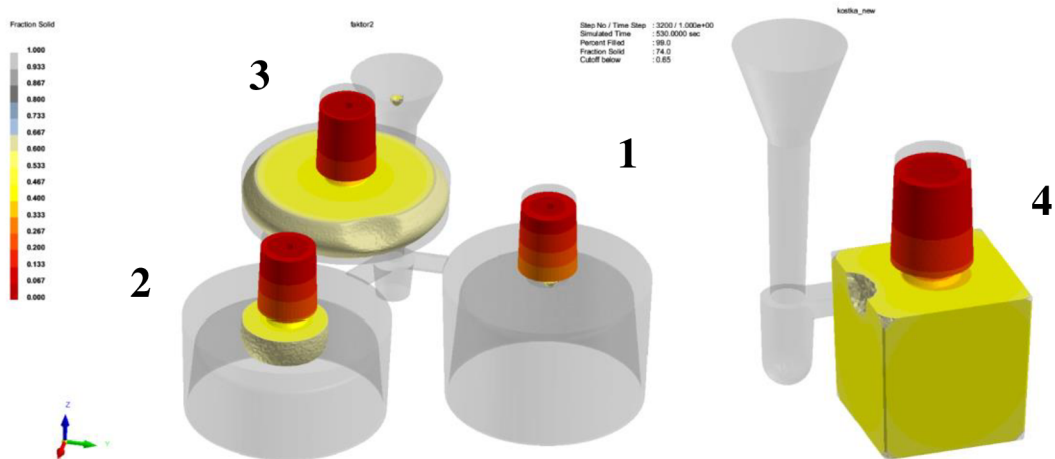
Dále je z posledního řádku **tab. 6** zřejmé, že paradoxně nejvyšší využití nálitku měl odlitek 4. geometrické varianty (II4-A, II4-B). Kov v žebrech odlitku 1 a 2 začal tuhnut krátce po zaplnění formy, což mělo vliv na využití nálitku. Brzké tuhnutí žeberek je zobrazeno na snímku z numerické simulace (**obr. 42**). Už ve 29. sekundě je možné v simulaci pozorovat ztuhlou část žebra. Zářezy vtokové soustavy ztuhly cca po třech minutách. Do té doby mohla vtoková soustava (zčásti díky většímu metalostatickému tlaku než nálitku) částečně zásobovat odlitek tekutým kovem. Největší objem ploché části (ne žebro) má odlitek 4, proto byla staženina největší a využití nálitku bylo nejvyšší.



Obr. 42 Tuhnutí odlitků.

Dále simulace ukázala rozdílnost tuhnutí kovu v jednotlivých geometrických variantách, což bylo patrné i z modulů. Na **obr. 43** je znázorněno tuhnutí kovu v deváté minutě od začátku lití. V této době vykazuje simulace u geometrie 1 ztuhnutí ze 100 %, 2. geometrie se také blíží 100% ztuhnutí. 3. geometrie je ve stejné době tvořena převážně tekutou fází a 4. geometrie je celá v tekutém stavu, kromě místa napojení zářezu na odlitek. Podle simulace odlitek 3 ztuhl po 20 minutách a odlitek 4 po 25 minutách, což zhruba odpovídá naměřeným hodnotám z termočlánků umístěných v nálitcích.

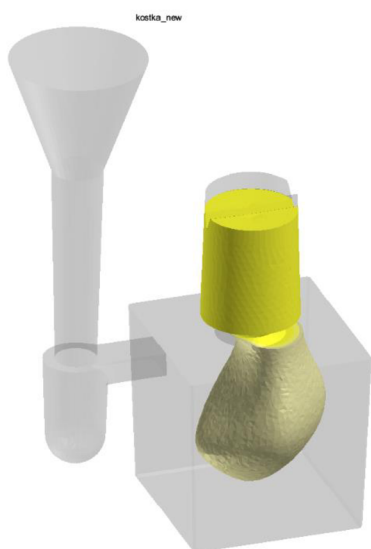




Obr. 43 Rozdílné tuhnutí geometrických variant.

Zajímavý je průběh tuhnutí 4. geometrie. Odlitek chladne ze strany zářezu intenzivněji, a tím dochází k nesymetrickému tuhnutí, tj. posunutí tepelné osy mimo geometrickou osu. Na **obr. 44** je zaznamenáno tuhnutí odlitku ve 21. minutě. Simulace později ukazuje vznik staženiny v části posledního tuhnutí kovu v odlitku. Výpočty numerické simulace naznačují riziko výskytu staženiny (nebo jiné vady) v odlitku, což je v souladu s výsledky hodnocení reálných odlitků i výpočtů modulů (viz podkapitola 4.3). Vada byla v podobě ředin a je zobrazena na **obr. 45**.

Nezapálení exotermické směsi nálitků mělo vliv na tvar staženiny. Je možné předpokládat, že kdyby došlo k zapálení, bylo by možné pozorovat pokles hladiny, který se u nálitků neprojevil. Dále by mohlo dojít ke snížení pórovitosti v odlitku a zvýšení pórovitosti v nálitku v důsledku delší doby tuhnutí nálitku.



Obr. 45 Nesymetrické tuhnutí 4. geometrie.

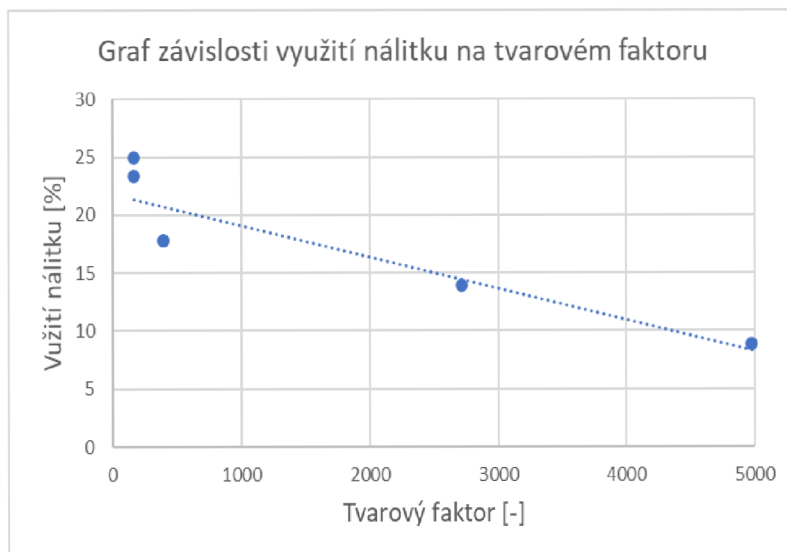


Obr. 44 Řediny v odlitku.

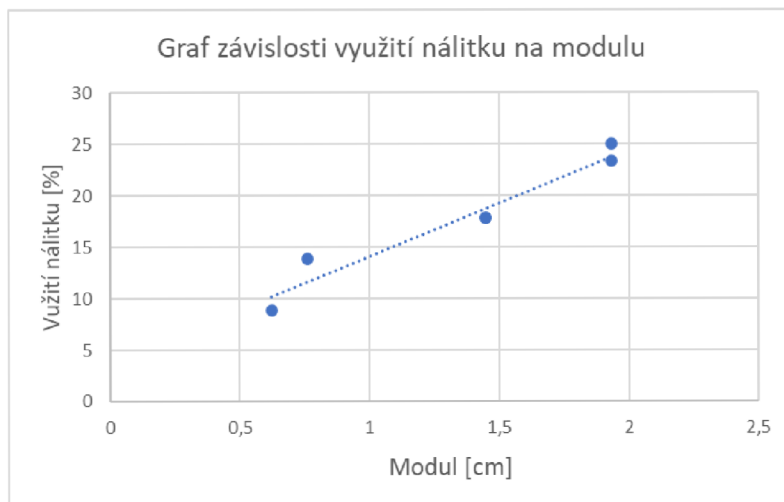
Na následujících grafech (**obr. 46 a 47**) je znázorněn vliv tvarového faktoru a modulu na využití nálitku. Grafy znázorňují lineární závislost využití nálitku na modulu a tvarovém faktoru. V obou grafech jde se vzrůstající tloušťkou stěny (vyšší modul nižší tvarový faktor) o vyšší využití nálitku.

V odlitku krychle (odlitek 4) a disku (odlitek 3) s nejnižším tvarovým faktorem bylo překvapivě nejvyšší využití nálitku. U těchto odlitků se patrně projevil vliv nezapálení exotermického obalu nálitku. Vyšší hodnota dichte indexu a tím relativně vysoká pórovitost

ovlivnila stahování odlitek a využití nálitků. U rychleji tuhoucích odlitek (odlitek 1 a 2) bylo nižší využití patrně negativně ovlivněno nezapařením exotermického obalu nálitku a poměrně vysokou hodnotou dichte indexu. Vyšší naplynění taveniny mělo za následek vyšší pórovitost, což mělo vliv na stahování odlitek.



Obr. 46 Závislost využití nálitku na tvarovém faktoru odlitku.



Obr. 47 Závislost využití nálitku na modulu odlitku.

## 5 ZÁVĚRY

Práce obsahuje literární rešerši zabývající se nálitkováním a tuhnutím kovů, zejména slitin hliníku. V teoretické části byl proveden rozbor a popis vlivů na využití nálitků, jako je např. vliv tvaru odlitku, tepelného režimu nálitku, naplynění slitiny a další.

V rámci praktické části byl navržen experiment. Cílem experimentu bylo ověřit vliv tvaru a modulu zkušebních odlitků na využití nálitků z materiálu DIN 226. Výsledky byly ověřeny kapilární zkouškou, posuzováním objemu a tvaru staženiny, porovnáváním hustot a hodnocením mikrostruktury (DAS index).

Analýza kapilární zkoušky potvrdila pohledem zřetelnou vysokou pórovitost u všech odlitků. V žebrech byla pórovitost nižší, což bylo dáno rychlejším tuhnutím kovu. Pórovitost odlitku (mimo žebra) byla vysoká z důvodu vyššího naplynění kovu.

Porovnáním hustot odlitku v podnálitkové a krajní části se neprojevila výrazná změna. Pouze u odlitků s nejvyšší hodnotou modulu (krychle) byla prokázána změna hustoty. Hustota v tepelné ose byla oproti kraji menší. Změna byla dána vyšším rozdílem dob tuhnutí v krajní a podnálitkové oblasti.

Z výsledků hodnocení mikrostruktury pomocí měření DAS indexu byla zjištěna u tenkostěnných odlitků až 3x jemnější mikrostruktura v krajní části žebra oproti podnálitkové části odlitku. U odlitků s vyšší hodnotou modulu byl rozdíl v mikrostruktuře menší. Mikrostruktura a výpočty modulů odlitků naznačily, že na dobu tuhnutí nemá zásadní vliv délka chladicího žebra, ale jeho přítomnost.

Posledním a nejdůležitějším hodnocením parametrů odlitků byl tvar a velikost staženiny. Staženiny byly soustředěny v oblasti Williamsova jádérka, kromě jedné atypické staženiny. Odlitky s vyšší hodnotou modulu (nižší tvarový faktor) měly vyšší využití nálitku. Vyšší využití nálitku bylo způsobeno zřejmě tím, že u tlustostěnných odlitků došlo k vyššímu podílu zásobování kovu nálitkem než u tenkostěnných. Stahování tenkostěnných odlitků, kvůli rychlejšímu tuhnutí (rychlejší stahování), bylo částečně kompenzováno kovem z vtokové soustavy. Negativní vliv na využití kovu zejména u tenkostěnných odlitků mělo nezapálení exotermických nálitků. V tavenině bylo vyšší naplynění, které snížilo využití nálitků, protože se část objemu staženin přemístila do pórů v odlitku.

Reálné odlitky byly porovnány s numerickou simulací. Simulace až na drobné odchylky odpovídala realitě. Simulace a výpočty modulů předvíдалy vadu v odlitku 4. geometrie (krychle), ta byla prokázána (v obou odlitcích 4 geometrie) ve formě ředin.

Tvarů a vzorků bylo v práci použito jen několik. Pro další práci bych doporučoval zvětšit počet experimentů z důvodu eliminace chyb a rozšířit množství tvarů (podobný hrncový tvar, ale s jinými rozměry). Dále by bylo zajímavé posuzovat vliv naplynění slitiny na využití nálitku, vliv umístění nálitku na využití nálitku nebo faktory ovlivňující zapálení obalu nálitku.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [26]

- 1 *Sborník přednášek z 56. slévárenských dnů*. Divadelní 6 P. O. Box 134 657 34 Brno: Česká slévárenská společnost, z.s., člen ČSVTS Praha, 2019. ISBN 978-80-02-02882-6. Dostupné také z: [https://www.slevarenskedny.cz/sborniky/56\\_SD\\_SBORNIK.pdf](https://www.slevarenskedny.cz/sborniky/56_SD_SBORNIK.pdf)
- 2 *Zpráva o společenské odpovědnosti firmy Ernst Leopold v r. 2018*. Ernst Leopold [online]. 2018 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://ernstleopold.cz/wp-52content/uploads/2019/12/scr\\_el\\_2018\\_cz.pdf](https://ernstleopold.cz/wp-52content/uploads/2019/12/scr_el_2018_cz.pdf)
- 3 PŘIBYL, Josef. *Řízené tuhnutí ocelových odlitků*. Praha: SNTL, 1986, 382 s.: il.
- 4 JELÍNEK, Petr. *Slévárství*. 3 vydání. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 1992, 256 stran: ilustrace.
- 5 MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. 1. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s.: il. ISBN 80-89041-88-4.
- 6 FISCHERL, Stefan A. a Calogero VASSALLO. *Process improvement by optional use of feeding systems*. 72. SSK Nayoga. 2016, (K514/O-127), str. 1–2.
- 7 BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie Slévání*. 3., upravené vydání, brožované. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, Katedra materiálu a strojírenské technologie, listopad 2006. 176 s. ISBN 80-7043-491-0.
- 8 ELBEL, Tomáš. *Vady odlitků ze slitin železa: klasifikace, příčiny a prevence*. Brno: Matecs, 1992.
- 9 PRAT, Josep, Garikoitz ARTOLA, Guillermo TRILLO a Julian IZAGA. *High performance cast parts. Advanced feeding systems for metallurgical optimization*. 72. SSK Nayoga. 2016, (K514/O-124), str. 1–2.
- 10 FISCHER, Stefan A., Lee R. HORVATH, Ralph E. SHOWMAN a Udo SKERDI. *The Evolution of High Performance Feeding Aids to Improve Casting Quality* [online]. Dublin, Ohio, USA: American Foundry Society, 2012, str. 1–9 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: [https://www.ask-chemicals.com/fileadmin/user\\_upload/Download\\_page/professional\\_articles/EN/The\\_Evolution\\_of\\_High\\_Performance\\_Feeding\\_Aids.pdf](https://www.ask-chemicals.com/fileadmin/user_upload/Download_page/professional_articles/EN/The_Evolution_of_High_Performance_Feeding_Aids.pdf)
- 11 DENG, Cheng-yang, Jin-wu KANG, Hao-long SHANGGUAN et al. *Insulation effect of air cavity in sand mold using 3D printing technology*. China Foundry 15, 37–43 (2018). <https://doi.org/10.1007/s41230-018-7243-y>
- 12 BAKER, Bryan. *Inovative company – a full mould casting success*. Foundry Trade Journal, 2010(3671), str. 16–17.
- 13 ČADA, Radek. *Technologie I., část tváření a slévání (návody do cvičení)*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008, 188 s. ISBN 80-7078-540-3.
- 14 *Faprosid s. r. l.* [online]. Via San Pancrazio [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.faprosid.com/>
- 15 *SEEIF ceramic, a. s.* [online]. Rajec Jestřebí [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://ceramic.cz/cs/slevarensky-prumysl/>
- 16 VOIGT, Ulrich, Peter VIETORIS a Dan TÁBORSKÝ. *Přímé lití na filtr — optimalizace výrobního procesu s použitím pěnových keramických filtrů*. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2017, 65 (9—10), str. 304—305. ISSN 0037-6825.
- 17 TAVAKOLI, Rohallah a Parviz DAVAMI. *Automatic optimal feeder design in steel casting process. Computer methods in applied mechanics and engineering* [online]. Elsevier B.V, 2008, 197(9), 921-932 [cit. 2020-12-07]. ISSN 0045-7825. Dostupné z: doi:10.1016/j.cma.2007.09.018
- 18 NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.

- 19 Massaging systems for cast iron. *Vesuvius* [online]. London, Great Britain, [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/fr-fr/foundry/iron-foundry/feeding-systems.html>
- 20 *Huettenes Albertus* [online]. 1997 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.huettenes-albertus.cz/>
- 21 *Inheat spol. s.r.o.* [online]. Teplice, Česká republika, 2010 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <http://www.inheat.cz/>
- 22 ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- 23 CHASTAIN, Stephen D. *Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry, volume 2*. 1. USA: Chastain Publishing, 2003, 192 s. 2, 2. ISBN 978-0970220332. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=3O5kqZww24gC&printsec=frontcover&dq=sand+casting&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwju-LGi44nvAhWBK3cKHeToAdoQuwUwAHoECAAQCQ#v=onepage&q&f=false>
- 24 SADOKHA, Andrew M. *Productin of casting made of aluminium alloy casting in a metal mold*. Liteynoye proizvodstvo. Liteynoye proizvodstvo, 2017, 14(1), str. 18–22. ISSN 0024-449X
- 25 FASEVICH, Jurij N. a Fiodar I. RUDNITSKI. *Development of methodology of experimental studies of control in crystallization of castings by optimizing the thermophysical properties of the elements of the gating system. Lit'ë i metallurgiâ* [online]. Belarusian National Technical University, 2018, 92(3), str. 36–42 [cit. 2021-02-25]. ISSN 1683-6065. Dostupné z: doi:10.21122/1683-6065-2018-3-36-42
- 26 *Citace pro* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Celková plocha	[mm <sup>2</sup> ]
DI	Dichte index	[-]
DAS	Vzdálenost sekundárních os dendritů	[μm]
<i>d</i>	Nejmenší průměr vtokového kůlu	[cm]
<i>f</i>	Faktor posunutí modulu	[-]
<i>g</i>	Gravitační zrychlení	[m·s <sup>-2</sup> ]
H	Výška hladiny kovu ve vtokové soustavě	[μm]
<i>L</i>	Vzdálenost přes více dendritů	[m]
<i>M</i>	Geometrický modul	[cm]
<i>M<sub>t</sub></i>	Tepelný modul	[cm]
<i>m<sub>s</sub></i>	Hmotnost surového odlitku	[kg]
<i>m<sub>vz at</sub></i>	Hmotnost vzorku na vzduchu	[g]
<i>m<sub>vz H2O</sub></i>	Hmotnost vzorku ve vodě	[g]
<i>n</i>	Počet sekundárních os dendritů, přes které se měří	[-]
<i>q</i>	Tvarový faktor	[-]
S	Ochlazovaný povrch	[cm <sup>2</sup> ]
<i>S<sub>k</sub></i>	Nejmenší průřez vtokového kůlu	[cm <sup>2</sup> ]
<i>S<sub>z</sub></i>	Průřez zářezů	[cm <sup>2</sup> ]
<i>S<sub>z1</sub></i>	Průřez jednoho zářezu	[cm <sup>2</sup> ]
<i>t<sub>l</sub></i>	Teplota likvidu	[°]
<i>t<sub>s</sub></i>	Teplota solidu	[°]
V	Objem	[cm <sup>3</sup> ]
<i>V<sub>N</sub></i>	Objem původního nálitku	[cm <sup>3</sup> ]
<i>V<sub>S</sub></i>	Objem staženiny	[cm <sup>3</sup> ]
<i>v<sub>d</sub></i>	Teoretická rychlost tečení kovu	[m·s <sup>-1</sup> ]
<i>v<sub>s</sub></i>	Skutečná rychlost tečení kovu	[m·s <sup>-1</sup> ]
<i>ν</i>	Šířka dvoufázového pásma	[mm]
<i>ρ</i>	Hustota slitiny	[kg·cm <sup>3</sup> ]
<i>ρ<sub>H2O</sub></i>	Hustota vody	[g·cm <sup>3</sup> ]
<i>ρ<sub>vz</sub></i>	hustota vzorku	[g·cm <sup>3</sup> ]
<i>ρ<sub>vz atm</sub></i>	Hustota vzorku ztuhlého na vzduchu	[g·cm <sup>3</sup> ]
<i>ρ<sub>vz vak</sub></i>	Hustota vzorku ztuhlého ve vakuu	[g·cm <sup>3</sup> ]
<i>μ</i>	Velikost dvoufázového pásma v tepelné ose	[mm]
<i>μ<sub>vs</sub></i>	Odpor vtokové soustavy	[-]
<i>η<sub>N</sub></i>	Využití nálitku	[%]
<i>τ</i>	Doba lití	[s]
<i>τ<sub>iso,exo</sub></i>	Doba tuhnutí exotermického nebo izotermického nálitku	[s]
<i>τ<sub>př</sub></i>	Doba tuhnutí přirozeného nálitku	[s]
<i>ω</i>	Úhel tuhnutí	[°]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Výroba odlitků z železných a neželezných slitin v ČR [2].	9
Obr. 2 Fázový diagram Al-Si [5].	10
Obr. 3 Tuhnutí slitiny [4].	10
Obr. 4 Schéma zásobování a tuhnutí usměrněného odlitku [6].	11
Obr. 5 Vyjádření usměrněnosti tuhnutí odlitku [4].	12
Obr. 6 Znázornění metody vepsaných koulí [7].	13
Obr. 7 Tepelné uzly [4].	13
Obr. 8 Spoje a přechody stěn [4].	14
Obr. 9 a) vnější, b) vnitřní chlazení tepelných uzlů [4].	15
Obr. 10 Použití nálitků a vnějšího chladítka pro eliminaci tepelných uzlů [4].	15
Obr. 11 Rozdělení nálitků [13].	16
Obr. 12 Obklad nálitku s podnálitkovou podložkou [14].	17
Obr. 13 Nálitek izolovaný vzduchovými dutinami [11].	18
Obr. 14 Vliv tloušťky exotermického obalu na využití nálitku.	20
Obr. 16 Přilehlý (A), polopřilehlý (B), Odlehlý (C) nálitek [4].	20
Obr. 15 Průtočný nálitek. [16].	20
Obr. 17 Vrchní a spodní nálitek [3].	21
Obr. 18 Tvary nálitků [17].	21
Obr. 19 Obecně dobře a špatně volené nálitky [18].	22
Obr. 20 Tvary tvarových obalů nálitků [14].	22
Obr. 21 Obal nálitku pro strojní formování s nástavcem [19].	23
Obr. 22 Tvary skládaných obkladů [15].	23
Obr. 23 Rohož [21].	24
Obr. 24 Využití nálitku.	24
Obr. 25 Porovnání přirozeného, exotermického a mini-nálitku [10].	26
Obr. 26 Struktura materiálu DIN 226.	27
Obr. 27 Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a slitinách Al-Si [21].	28
Obr. 28 Plyn v nálitku [23].	28
Obr. 29 Metoda dvojího vážení [21].	29
Obr. 30 První návrh geometrií odlitků.	30
Obr. 31 Posuzované čtyři geometrie odlitků.	31
Obr. 32 Vtoková soustava.	31
Obr. 33 Tepelné moduly v určitých místech odlitku.	33
Obr. 34 Surové odlitky s obaly nálitků.	34
Obr. 35 Poloha termočlánků.	34
Obr. 36 Vakuový přístroj a laboratorní váha.	35
Obr. 37 Graf tuhnutí odlitků.	35
Obr. 38 Kapilární zkouška.	36
Obr. 39 Umístění vzorků.	37
Obr. 40 Měření DAS indexu.	38
Obr. 41 Staženiny.	39
Obr. 42 Tuhnutí odlitků.	40
Obr. 43 Rozdílné tuhnutí geometrických variant.	41
Obr. 44 Řediny v odlitku.	41
Obr. 45 Nesymetrické tuhnutí 4. geometrie.	41
Obr. 46 Závislost využití nálitku na tvarovém faktoru odlitku.	42
Obr. 47 Závislost využití nálitku na modulu odlitku.	42

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání tepelného modulu u izotermického a exotermického nálitku [14]. .....	25
Tab. 2 Porovnání různých typů nálitků [10, 14]. .....	26
Tab. 3 Parametry odlitků. ....	33
Tab. 4 Hustota materiálu ve středu a na kraji odlitku. ....	38
Tab. 5 Hodnot DAS indexu. ....	39
Tab. 6 Využití nálitku. ....	40

## SEZNAM PŘÍLOH

### Příloha 1: Metalografické hodnocení

- Obr. P1.1 Metalografický snímek I1S
- Obr. P1.2 Metalografický snímek I1K
- Obr. P1.3 Metalografický snímek I2S
- Obr. P1.4 Metalografický snímek I2K
- Obr. P1.5 Metalografický snímek I3S
- Obr. P1.6 Metalografický snímek I3K
- Obr. P1.7 Metalografický snímek II3S
- Obr. P1.8 Metalografický snímek II3K
- Obr. P1.9 Metalografický snímek II4S-A
- Obr. P1.10 Metalografický snímek II4K-A
- Obr. P1.11 Metalografický snímek II4K-B
- Obr. P1.12 Metalografický snímek II4K-B

### Příloha 2: Nálitky P69I [14]

### Příloha 3: Výkresy zkušebních odlitků

- Odlitek 1. geometrie BP-01
- Odlitek 2. geometrie BP-02
- Odlitek 3. geometrie BP-03
- Odlitek 4. geometrie BP-04