



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA ODLITKŮ METODOU VYPAŘITELNÉHO MODELU

CASTING PRODUCTION - FULL MOULD TECHNOLOGY

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Lekeš

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

BRNO 2018

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Petr Lekeš**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

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:

## Výroba odlitků metodou vypařitelného modelu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba odlitků metodou vypařitelného modelu patří mezi nekonvenční technologie výroby strojních součástí odléváním. Model je v podstatě originál, jenž se vypaří při odlévání. Technologie umožňuje oproti konvenčním modelům vyrobit i tvarově složité odlitky bez nutnosti užití dělicí roviny, úkosů apod. Avšak s jistým omezením velikosti vzhledem k deformacím samotného polystyrenového modelu.

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem bakalářské práce je provést literární rešerši výroby odlitků uvedenou nekonvenční technologií.

Nepodmíněným vedlejším cílem je doplnění práce o vlastní navržený experimentální odlitek.

### Seznam doporučené literatury:

ELBEL, T. Speciální metody výroby odlitků. Studijní opora, FMMI, VŠB-TU Ostrava, 2008, 95 s.

MONROE, R.W. Expendable pattern casting. Des Plaines IL: American Foundrymen's Society, 199. 120 p. ISBN 08-743-3150-1.

JECH, J. Problematika výroby polystyrenových modelů. Slévárenství LVI. 2008, 1–2, s. 29-30. ISSN 0037-6825.

WILLIAMS, D. Casting in on today's lost foam. Modern Casting. 2005, vol.95, no. 12, p. 39-41.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

LEKEŠ Petr: Výroba odlitků metodou vypařitelného modelu

---

Cílem této bakalářské práce je vypracovat kompletní studii na téma výroba odlitků metodou vypařitelného modelu a své znalosti následně uplatnit při výrobě vlastního odlitku libovolného tvaru. Na základě zadání je práce rozdělena do dvou částí, kdy první z nich se zabývá problematikou výroby odlitků touto technologií, od výroby vypařitelných modelů, přes moderní technologie využívané při této metodě lití, po možné vady odlitků, které jsou s touto metodou spojeny. Ve druhé části je popsán proces výroby experimentálního odlitku. Výsledkem této práce bylo seznámení s touto nekonvekční metodou odlévání a zhodnocení jejího uplatnění v dnešním slévárenském průmyslu, jakožto plnohodnotné alternativy pro běžně používané technologie odlévání.

Klíčová slova: Vypařitelný model, polystyrenový model, metoda vypařitelného modelu, výroba odlitků, výroba těžítka

## **ABSTRACT**

LEKEŠ Petr: Casting production – full mould technology

---

The aim of this thesis is to elaborate a complete study on the topic of production of castings by a evaporation pattern and the apply my knowledge I gained from completing this thesis and make my own cast. Based on the assignment the thesis is divided into two parts, where the first part is focused on the problems of production by this technology, from creating the evaporable pattern, through modern technologies used for this method of casting, to possible defects in the cast, which are connected with this method. In the second part is described the process of making the experimental cast. The result of this work was the familiarization with this unconventional method of casting and the evaluation of its application in today's foundry industry, as a full-value alternative for common casting technologies.

Keywords: Evaporation pattern, polystyrene pattern, lost foam, production of castings, production of paper weight

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Lekeš, Petr. *Výroba odlitků metodou vypařitelného modelu*. Brno, 2018. 31 s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor Slévárenství. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

## **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 Brně dne 25.5.2018

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Mé poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Vítězslavu Pernicovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a ochotu při konzultacích, kterou mi v průběhu zpracování věnoval. Dále bych chtěl tímto poděkovat mé rodině, která mne během bakalářského studia vždy podporovala.

## **OBSAH**

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

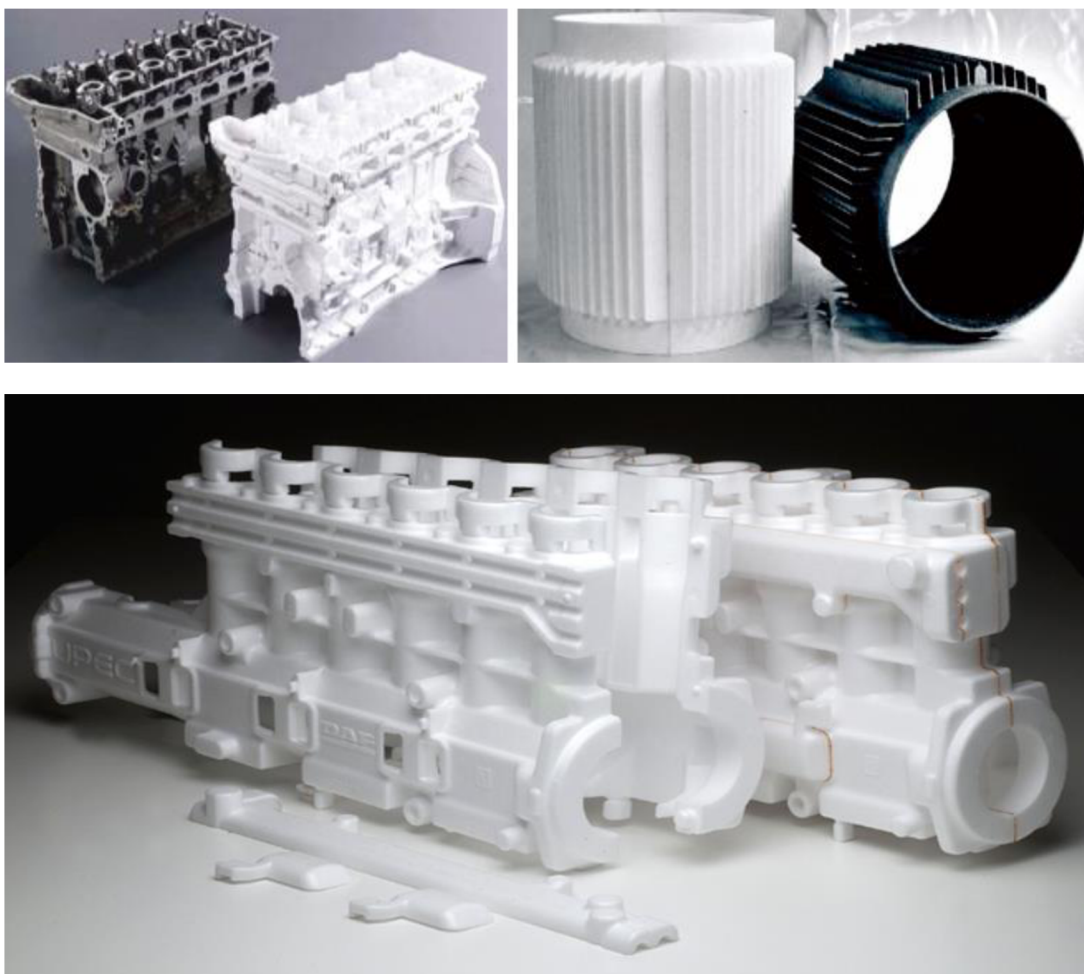
ÚVOD .....	9
1 PODSTATA LITÍ METODOU VYPAŘITELNÉHO MODELU .....	10
1.1 Výroba modelu .....	12
1.1.1 Materiál .....	12
1.1.2 Výroba modelu .....	13
1.1.3 Tvorba vtokové soustavy .....	17
1.1.4 Povrchová ochrana a sušení polystyrenových modelů.....	17
1.2 Formování .....	18
1.3 Moderní technologie využívané při lití metodou vypařitelného modelu .....	19
1.3.1 Lití pod vakuem a za nízkého tlaku .....	20
1.3.2 Tuhnutí za působení vibrací .....	20
1.3.3 Tuhnutí za působení tlaku .....	21
1.3.4 Odlévání vypařitelných skořepin za působení vakua a nízkého tlaku .....	22
1.4 Vady odlitek .....	22
2 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE .....	25
2.1 Výroba modelu .....	25
2.2 Formování modelu.....	25
2.3 Odlévání modelu .....	26
2.4 Dokončovací práce .....	27
3 ZÁVĚRY .....	29

Seznam použitých zdrojů



## ÚVOD [1,2,13,12]

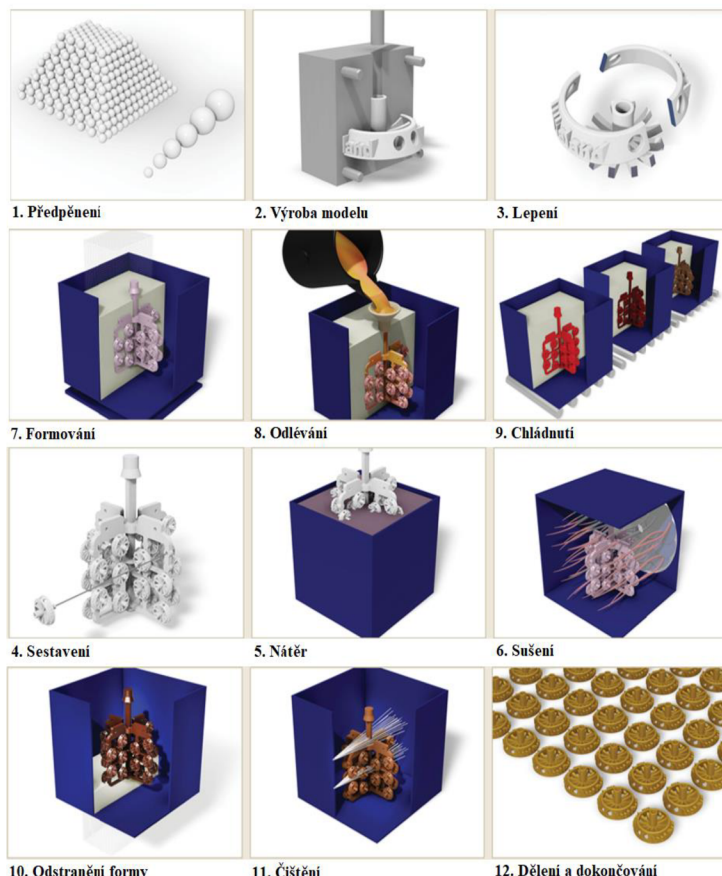
V současné době existuje široká škála možností výroby odlitků. Každá z těchto technologií má určité přednosti vzhledem k požadavkům na výsledný produkt, náročnost výroby, kvalitu odlévané součásti nebo ekonomické a ekologické vlastnosti. Výroba odlitků se provádí do jednorázových (pískových) nebo trvalých (kovových) forem. I přesto, že nejrozšířenějším způsobem odlévání, je stále gravitační lití do netrvalých forem, tak právě vysoké nároky zákazníků na slévárny jsou důvodem toho, že se často využívá nekonvekčních a zvláštních způsobů odlévání. Jde především o způsoby využívající zpravidla trvalých kovových forem za působení zvýšených sil při plnění, jako jsou metody přesného lití, mezi které patří například vysokotlaké, nízkotlaké, odstředivé, klopné nebo vakuové lití. K vývoji těchto technologií odlévání vedl důraz na zvýšení vnitřní kvality, rozměrové přesnosti nebo také snaha o maximální využití materiálu. Mezi další nekonvenční způsoby výroby odlitků, patří metoda lití na vypařitelný a vytavitelný model. Metody toho druhu nám umožňují vyrábět tvarově velmi složité odlitky. Lití na vytavitelný model je proces, u kterého se využívají modely, vyrobené z voskové směsi, srovnané do tzv. stromečku, jehož součástí je kromě modelů, také vtokový kůl. Na takto vytvořeném modelu se vytváří keramická vrstva (skořepina) opakovaným nanášením a sušením. Vytavením modelu vzniká forma vhodná k odlévání. Lití pomocí metody vypařitelného modelu je technologie, která využívá model vytvořený ze spalitelné směsi (obvykle polystyren), kde ochranu této směsi tvoří nátěr a samotný polystyren je při procesu lití spálen a nahrazen tekoucím kovem.



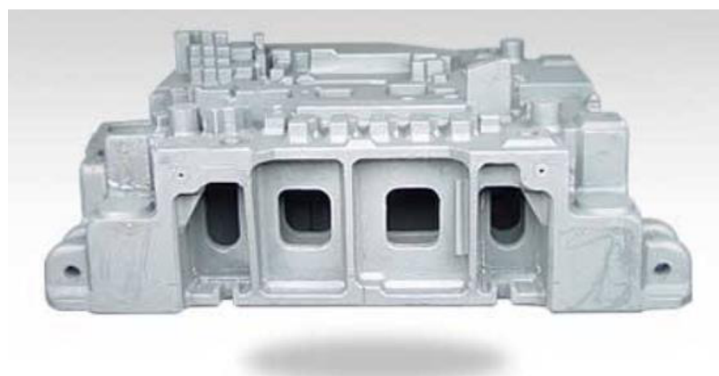
Obr. 1 Ukázka typických příkladů pro lití pomocí vypařitelného modelu [13] [12]

# 1 PODSTATA LITÍ METODOU VYPAŘITELNÉHO MODELU [2,3,6,14,15,10]

Metoda vypořítelného modelu, známá též, jako lití na spalitelný model, je poměrně moderní slévárenská technologie, založená na původním patentu H. F. Shroyera, jejíž vývoj nastal počátkem šedesátých let 20. století. Tato technologie byla původně používána při odlévání velkých kusových a uměleckých odlitků, ale v dnešní době je její uplatnění především při sériové výrobě tvarově velmi složitých a tenkostěnných odlitků z litiny a hliníkových slitin. V průmyslu byla tato metoda poprvé použita ve SRN, roku 1962, při výrobě odlitku o hmotnosti 12 tun. Během následujících let nastal velký rozmach této technologie a výsledkem bylo založení Asociace LSM v roce 1967, která spojila 150 slévárenských provozů se společnou výrobou 600 tun odlitků/den. Princip této metody spočívá v tom, že se odlévá do plné formy, kde se v místě vznikajícího odlitku nachází polystyrenový model, v některé literatuře označovaný, jako pěnový. Tento model se během samotného lití před postupujícím kovem vypařuje a vytváří tak dutinu pro budoucí odlitek. Z polystyrenu se zde vytváří nejen samotný model, ale i části vtokové soustavy nebo nálitky. Velký rozvoj užití pro kusovou výrobu, technologie lití metodou vypořítelného modelu, vyvolaly především nároky automobilového průmyslu pro lisovací nástroje. Se stále se stupňujícími nároky zákazníků na složitosti tvaru, hmotnost, jakost nebo ekonomickou stránku, dokáží dnes konstruktéři maximálně využít vlastností této metody k získání co nejlepších užitečných vlastností nástroje za snížených nákladů.



Obr. 2 Schéma technologie [15]



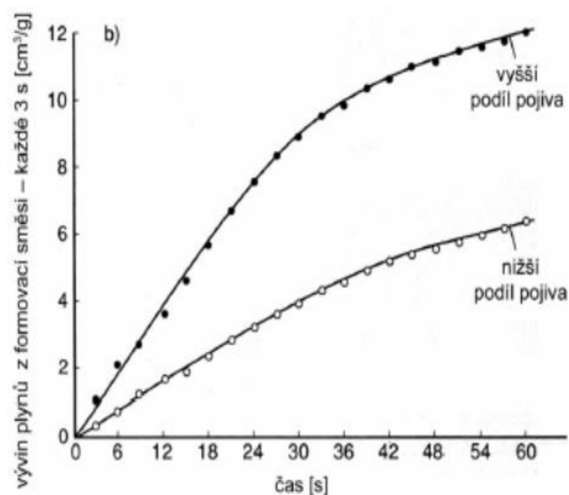
Obr. 3 Část lisovacího nástroje [10]

Tuto technologii můžeme z hlediska rozsahu výroby rozdělit na 2 základní postupy:

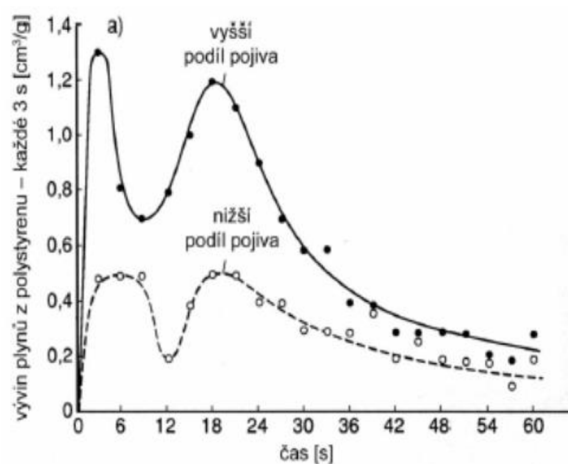
- odlévání jednotlivých kusů odlitků
  - polystyrenový model je vyráběn pomocí řezání, lepení, frézování atd.,
  - model se poté formuje do formovací směsi s pojivem,
  - metoda se používá pro výrobu odlitků tvářecích a lisovacích nářadí,
  - postup se využívá např. při výrobě i masivních odlitků ze šedé a tvárné litiny
- velkosériová výroba odlitků
  - polystyrenové modely jsou vyráběny ve vypěňovacích formách
  - model se pěchuje do suchého písku bez pojiva
  - tato varianta se používá u menších odlitků

### Specifika technologie

Metoda vypařitelného modelu se vyznačuje výraznou změnou tlakových poměrů ve formě, proto je dynamika a kinetika tvorby plynů v průběhu odlévání základním specifikem této metody tvorby odlitků. Tento jev má zásadní vliv kvalitu odlitků při lití a souvisí s ním i náklady na následné čistírenské práce nebo bezpečnost práce při odlévání. V návaznosti na pracnost v čistírnách a jakost odlitků provedl Výzkumný slévárenský institut v Düsseldorfu studii, jejíž zjištěním bylo, že při spalování 1 cm<sup>3</sup> polystyrenové směsi vzniká přibližně 20 cm<sup>3</sup> plynu, přičemž přesné množství závisí na síle stěny odlitku. V případě spalování furanové formovací směsi tato hodnota dosahuje, v závislosti na tloušťce stěny a podílu pojiva, rozmezí 9-18 cm<sup>3</sup> plynu. Nelze zanedbat i další vlivy ovlivňující vývin plynu při spalování modelu, jako je zvýšená vlhkost, vznikající nedostatečným stabilizováním polystyrenu nebo jeho navlhnutím v průběhu přípravy, nevhodně nanesená vrstva nátěru modelu a podobně. I silná vrstva lepidla, užitého při možném sestavování modelu, nebo lepicí páska může mít velký vliv na tvorbu plynu při spalování. Z této studie vyplývá, že při odlévání metodou spalitelného modelu vzniká ve formě 6-12krát větší množství plynu, jako při běžných metodách odlévání. V souvislosti s touto problematikou jsou zde uvedeny dva grafy, kdy graf na obrázku 5 znázorňuje vznik plynu v cm<sup>3</sup>/g v závislosti na furanové formovací směsi, s nižším a vyšším obsahem pojiva při metodě spalitelného modelu. Na grafu, nacházejícím se na obrázku 4, lze vidět součtovou křivku vývoje plynu z formovací směsi v cm<sup>3</sup>/g. Průběh těchto grafů jasně znázorňuje patrný vliv obsahu pojiva na vznik plynů při odlévání.



Obr. 4 Graf vývinu plynů z formovací směsi [6]



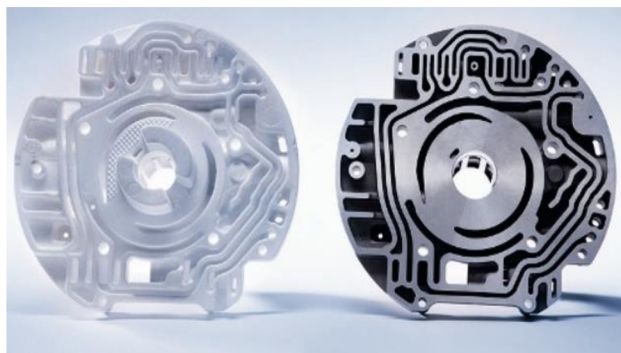
Obr. 5 Graf vývinu plynů z polystyrenu [6]

## Přednosti procesu lití metodou vypařitelného modelu oproti jiným metodám

Mezi hlavní přednosti této metody, oproti ostatním způsobům odlévání, patří poměrně velká rozměrová přesnost a nízká drsnost povrchu. Drsnost povrchů odlitků vyrobených metodou vypařitelného modelu se nachází v rozmezí od Ra 6,3 až 12,5  $\mu\text{m}$ . Hodnoty rozměrové přesnosti takto vyrobených odlitků dosahují třídy CT5 a CT7. Tyto parametry dosahují téměř hodnot přesného lití. Technologické přídavky odlitků vyrobených touto metodou jsou nižší než 1,5 až 2 mm, což je podstatnou výhodou této metody, jelikož klesají náklady spojené s konečným obráběním. Čas, který je běžně potřebný k mechanickému opracování lze touto metodou snížit o 40–50 % oproti tradičním metodám odlévání. Nespornou výhodou metody vypařitelného modelu je její velká flexibilita. Při výrobě modelu nenastává žádné omezení technologií a lze tak odlévat celé požadované odlitky. V důsledku toho, že vypařitelný model má přímo tvar odlitku, může být odstraněno jádro. Velká výhoda je to především při odlévání tvarově složitých struktur odlitků plných dutin, záhybů a pórů. Odstranění jádra vede ke snížení výrobního času a tím i konečných nákladů na výrobu požadované součásti. U metody vypařitelného modelu se při velkosériové výrobě používá formování bez použití poživ. Tímto se výroba odlitků velmi zjednodušuje, což vede k vysoké pracovní produktivitě. Jelikož se do formovací směsi nepřidává žádné pojivo, lze použít ostřívo znova, čímž se opět snižují náklady na výrobu. Při této metodě lze vypustit tradiční přípravu a míchání směsi a lze skládat i několik odlitků do jednoho kontejneru, čehož se využívá právě u velkosériové a automatizované výroby.

### 1.1 Výroba modelu [9]

Jelikož má vytvořený polystyrenový model konečný tvar a rozměry požadovaného odlitku, je jeho výroba samostatným odvětvím zahrnující problematiku, jako jsou výběr materiálu modelu, který má velký vliv na výsledné vlastnosti odlitku, technologie výroby, související s časovou energetickou a tím i ekonomickou stránkou celého procesu. I následovný nátěr je nedílnou součástí tvorby modelu, jehož tloušťka ovlivňuje pevnost modelu nebo jeho propustnost plynů.

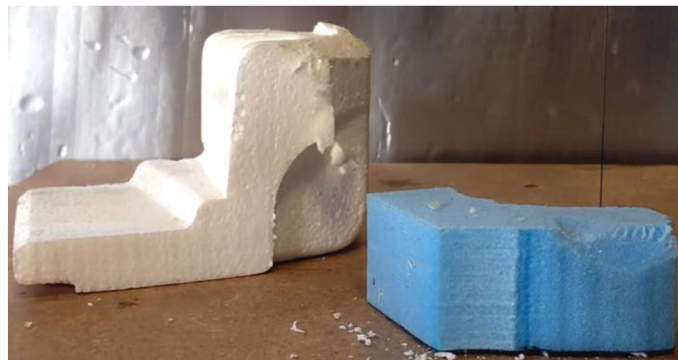


Obr. 6 Ukázka tvaru modelu a odlitku [9]

#### 1.1.1 Materiál [2,6,8,14]

Dle základních vlastností můžeme shrnout nejvyužívanější materiály k výrobě modelů, na tyto 3 základní typy. Patří mezi ně polystyrenový termoplastický EPS (expandovaný polystyren) bílý, který má v dnešní době velké zastoupení a je hojně využívaným materiálem k tvorbě modelového zařízení. Další hmotou, užívanou při lití metodou vypařitelného modelu, je speciálně k této technologii vytvořený EPS modrý. Tato hmota je vytvořena za účelem získání co nejlepších vlastností při lití a tvorbě modelu. Je charakterizována měrnou hmotností 18-20  $\text{kg}/\text{cm}^3$  a ve srovnání s původním bílým EPS se vyznačuje podstatně lepší obrobiteľností a také povrchovou tvárností. Tento materiál se lépe zplyňuje a vytváří menší množství vměstků v horní vrstvě odlitku, ale na druhou stranu vede k vyššímu vývinu plynu

a nasákavosti. EPS modrý se řadí mezi materiály s vyššími pořizovacími náklady. Pěnová hmota PMMA (polymethylmethakrylát) je velmi těkává látka, která se také řadí mezi vhodné materiály při výrobě modelu na tuto metodu lití. Při spalování zde dochází k rozkladu především na plynné produkty, pomocí čehož se na povrchu stoupajícího kovu tvoří podstatně méně vměstků, než za použití klasických materiálů EPS. Jelikož se cena pěnové hmoty PMMA pohybuje až v osminásobku ceny EPS, má její využití smysl jen při výrobě odlitků se speciálními požadavky na jakost. Objem vývinu plynu při spalování je u této hmoty největší ze všech materiálů.



Obr. 7 Ukázka materiálů EPS [8]

Pro ocelové litiny a odlitky z litiny

s kuličkovým grafitem se jako surovina užívá kromě EPS i PMMA. Pěnová hmota PMMA se používá zejména v USA a Japonsku. Z důvodu vysoké ceny polyakrylátu PMMA se přistupuje na ekonomicky přijatelnější směs polyakrylátu a polystyrenu. Expandovaný polystyren EPS je nejvíce aplikovaným materiálem pro hliníkové slitiny. V současné době, i když tomu tak dlouho nebylo, je EPS hodnocena, jako nejvíce vhodnou hmotou pro odlitky z litiny s lupínkovým grafitem, především kvůli menší nasákavosti a nižšímu vývinu plynu. Nedílnou součástí výroby modelů v dnešní době je i užití výpočetní techniky. Software 3D technologie a CNC obráběcí stroje podstatně zvyšují produktivitu výroby modelu, zkracuje dobu a zlepšuje jakost a přesnost výroby.

### **Předpěnění materiálu**

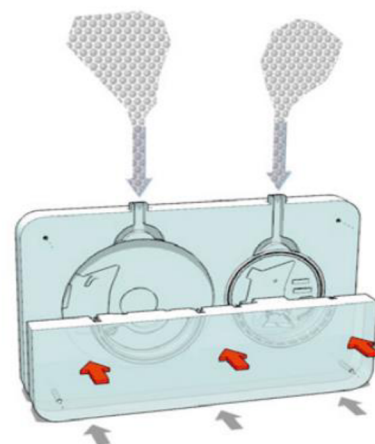
Výchozí surovinou je polystyren se zrnitostí 0,2 – 0,4 mm, který je schopen pomocí obsahu vázaného pentanu se tepelně uvolňovat a působit, jako nadouvadlo. Za stálého míchání se surový polystyren ohřívá přehřátou párou s teplotou 120-130 °C. Ohřívání zapříčiní uvolnění asi poloviny pentanu, který způsobí téměř 30 % expanzi polystyrenu. Právě pomocí předpěnění hmoty se redukuje měrná hmotnost z původních 600 g/l na zhruba 15-40 g/l. Typická měrná hmotnost pro EPS, který se používá pro výrobu polystyrenového modelu se pohybuje mezi 20 a 26 g/l. Po dosažení požadované expanze se kuličky chladí a suší pomocí foukání studeného vzduchu. Předpěnění materiál se dále nechává zrát a stabilizovat.

### **1.1.2 Výroba modelu [2,4,7,14,17,18,19,20]**

#### **Výroba modelu ve vypěňovacích formách**

Polystyrenový model vzniká vyplněním formy předpěněným polystyrenem. Cílem je dosáhnout určité objemové hmotnosti. S vyšší objemovou hmotností dostáváme kompaktnější tvar, ale odlitek má horší povrch. Modely se vyrábí podle typu slitiny a konstrukčních požadavků. Svaření a zpevnění hmoty je zajištěno pomocí přívodu tepla, obvykle vháněním horké páry do jaderníku, což způsobuje měknutí a vlivem uvolnění zbytkového nadouvadla dochází k expanzi polystyrenových kuliček, pomocí čehož dosáhneme ostrých obrysů modelu. Expanze je ukončena uzavřením přívodu páry

a v poslední fázi ochlazováním jaderníku vodou. K výrobě kvalitního polystyrenového modelu je nutno při jeho výrobě optimalizovat mnoho parametrů, jako jsou měrná hmotnost, teplota a vhodný tlak páry, čas propařovacích kroků a vhodný způsob chlazení. Po ochlazení je model vytažen a nadále se suší proudem vzduchu o teplotě 40-50°C. U složitějších modelů je další fází výroby konečné zkompletování. Při tomto procesu se tvar vypěněného modelu doplňuje o konstrukční části, které nebylo možné vytvořit pomocí jedné formy z důvodu velké obtížnosti její výroby. Sestavení polystyrenového modelu z více částí se provádí pomocí horkých tavných lepidel s okamžitou pevností spoje. Při závěrečné kompletaci modelu se rovněž přilepují části vtokové soustavy. Samotné vypěnění probíhá ve vypěňovacích formách, které jsou umístěny ve vypěňovacích lisech. Taková forma, vyrobená obvykle ze slitin hliníku, se může skládat ze dvou i více částí tak, aby se vytvořený model dal lehce uvolnit. Výroba takové formy je velmi nákladná.



Obr. 8 Schéma vypěňovací formy [7]

Při návrhu a konstrukci formy je třeba dodržet určité zásady:

- minimalizovat tepelné uzly ve stěnách formy,
- vhodně optimalizovat odvzdušnění formy pomocí propařovacích sítěk nebo mezer. Správné odvzdušnění forem je stěžejní pro jednoduché vyjmutí hotového polystyrenového modelu z forem, především u těch, které nejsou opatřeny vyhazovači,
- dalším podmínkou nutnou pro jednoduché vyjmutí z formy je dokonale hladký povrch formy, což se projevuje především u tvarově složitých modelů,
- nutnost odsávání za účelem minimalizace možnosti kondenzace vody,
- je nutná snaha o tvorbu co nejúplnějšího polystyrenového modelu vzhledem k budoucímu odlitku. Lepidlo vnášené na spoje vytváří v budoucím odlitku větší množství zbytků uhlíku, což zvyšuje zmetkovitost výroby,
- formy se vyrábějí výhradně z válcovaných nebo speciálně litých hliníkových slitin. Hliník používaný k výrobě forem nesmí obsahovat měď, jinak dochází k mezikrystalické korozi.



Obr. 9 Vypěňovací forma [20]

Technologie výroby polystyrenových modelů ve vypěňovacích formách se nevyplácí pro výrobu jednoho kusu odlitku, malosériovou výrobu nebo výzkum a vývoj nových produktů. Důvodem je výše zmíněná nákladná výroba kovové vypěňovací formy.

### Ruční výroba modelů

Ruční výroba polystyrenových modelů se využívá především u tvarově složitých částí, jejichž požadavky na přesnost nejsou příliš vysoké. Pro návrh a výrobu složitých modelů se obvykle používají polystyrenové pláty, které jsou slepovány dohromady do struktury výsledného modelu. Metoda ruční výroby je vhodná pro jednoduchou a malosériovou výrobu. Tato metoda se užívá například v uměleckém odvětví, jako je sochařství, kde se využívá právě její flexibility. Velkému využití se ruční výrobě dostává v malých a středních slévárenských společnostech, které těží z výhod, jako jsou nízké pořizovací náklady na vybavení nutné k výrobě modelu a velká tvarová flexibilita, která není téměř ničím omezena. Nevýhodou této metody může být nízká produktivita a špatná přesnost modelu a tím i výsledného odlitku. V současnosti se v průmyslu využívají především dva druhy nástrojů. První nástroj provádí řezání materiálu pomocí horkého drátu a využívá se pro vertikální a diagonální řezání. Dalším způsobem je řezání pomocí horkého řezného nástroje, u které lze snadno nastavit teplotu horkovzdušné čepele. Pro tento druh nástrojů je vhodná pouze krátká pracovní zátěž.



Obr. 10 Horký tavný drát [18]



Obr. 11 Horký řezný nástroj [19]

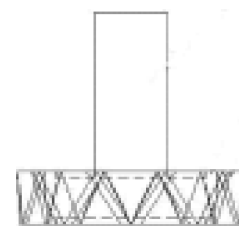
### CNC technologie

Vzhledem ke specifickým řezným vlastnostem materiálu může použití běžných obráběcích nástrojů způsobovat velkou ztrátu a nevyužití surového materiálu nebo nízkou kvalitu povrchu. Právě podle charakteristik polystyrenového materiálu byly vyvinuty speciální řezné nástroje. Je důležité správně navrhnout obráběcí nástroje, které jsou vhodné k obrábění tohoto materiálu a mohou být použity u CNC obráběcích strojů. Mezi hlavní problémy, ke kterým dochází při řezání polystyrenových materiálů patří obtížné odstranění třísky během obrábění a možná velká



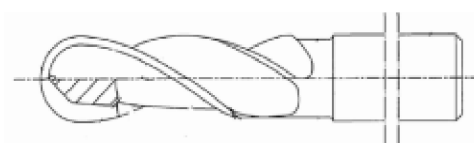
Obr. 12 Technologie CNC [17]

hrubost výrobku. Nerovnoměrná teplota při řezání horkým drátem může způsobit nerovnoměrný povrch plochy, proto byly navrženy modifikované rezné nástroje, které jsou vyvinuté právě pro polystyrenové materiály. Tyto nástroje mohou být upnuty přímo pomocí upínacích nástrojů. Jedná se o nástroje vytvořené z běžné čelní nebo boční frézy, jejichž konstrukce je velmi kompaktní a může být rychle instalována a pevně upnuta. Jedním z těchto nástrojů je čelní fréza znázorněna na obrázku 13, která má následující charakteristiky: rozteč břitů je 50° – 70°, horní a dolní rezné hlavy jsou konkávní a upínací lištu nástroje lze jednoduše upnout přímo



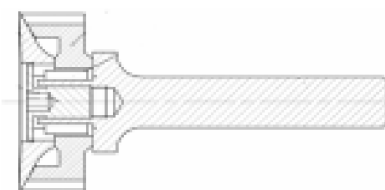
Obr. 13 Čelní fréza [4]

do upínacích nástrojů. U měkkého nekovového materiálu, jako je právě polystyren, se třísky často jednoduše přilepují k rezné hraně nástroje při řezání. Mnohé frézy vyráběné výrobcem nástrojů, mají malý úhel šroubovice nebo sklonu, a i kvůli krátké délce čepele je odstraňování třísek náročné. Na obrázku 14 můžeme vidět vysokorychlostní frézu určenou k obrábění nekovových materiálů.



Obr. 14 Fréza pro nekovové materiály [4]

Mezi výhody této frézy patří především dlouhá délka ostří a velký objem drážky, která pokrývá asi 50 % celého těla, pomocí čehož je řez ostrý a je zde dostatečný prostor pro odvod třísek. Obrázek 15 zobrazuje typ vícebřité frézy určený pro obrábění lehkých materiálů. Tyto nástroje jsou charakterizovány velmi ostrými břity a v porovnání s běžnými obráběcími nástroji, jejich dvojnásobným počtem. Více násobná drážka, určená k odvodu třísky, zajišťuje její rychlé odstranění. Konstrukce takových nástrojů jsou velmi pevné a stabilní. V porovnání s ručním řezáním se zlepšuje efektivita výroby a kvalita ploch obroběných reznými nástroji.



Obr. 15 Fréza pro obrábění lehkých materiálů [4]

### Srovnání technologií výroby modelů:

**Tabulka 1** Srovnání technologií výroby modelu [4]

Metoda	Výhody	Nevýhody
Vypěňovací forma	Vhodné pro sériovou výrobu, kvalita výrobku je dobrá	nákladné
Ruční řezání	Nízké pořizovací náklady, flexibilní při výrobě	Nízká efektivita, slabá přesnost
CNC obrábění	Vysoká účinnost, dobrá flexibilita zpracování	Odstranění třísek jen obtížné, drsný povrch po obrábění



### 1.1.3 Tvorba vtokové soustavy [2,9]

Vtoková soustava se vyrábí ze stejného materiálu, jako samotný model. Konstrukce vtokové soustavy musí zajistit vysokou rychlost lití, aby byla zajištěna co nejmenší mezera mezi modelem a hladinou stékajícího kovu. Vysoká rychlost lití kovu je důležitá z toho důvodu, že při pomalém stoupání hladiny výrazně roste mezera mezi kovem a modelem, což je příčinou stékání kapalného styrenu na tekutý kov. Tento jev vytváří uhlíkaté blány, lesklý uhlík a saze. Samotné lití je spojeno s rizikem vzniku tlakových vln, proto má správný návrh vtokové soustavy vliv na výslednou jakost odlitku. Vtokové soustavy se používají v zásadě ve dvou základních variantách, a to lití shora a lití na spodní vtoky. Největší výhodou vrchních vtoků je dobrý odvod plynu při lití, kdy již od začátku lití je pro průchod plynů volná větší část plochy a zplyňování modelu tekutým kovem je rychlejší. Nevýhodou vrchní vtokové soustavy, spolu s časovou náročností, může být podstatné zhoršení podmínek pro pechování v části rámu, kde je vtoková soustava situována. Nevýhodou spodních vtoků je menší plocha, pomocí které lze odvádět plyny vzniklé při lití, kde je ten to prostor vymezen pouze prostorem mezi modelem a tekutým kovem. U metody lití pomocí vypařitelného modelu za použití spodních vtoků se o to více zdůrazňuje vliv průchodnosti plynů skrze formovací směs a užitý nátěr. I kvůli nižší časové náročnosti na aplikaci spodních vtokových soustav se v praxi uplatňuje více právě tento typ.



Obr. 16 Ukázka vtokové soustavy [9]

### 1.1.4 Povrchová ochrana a sušení polystyrenových modelů [2,6,14,16,21,]

Při výrobě odlitků běžnou metodou slouží nátěr k ochraně formovací nebo jádrové směsi před teplenými i mechanickými účinky tekutého kovu. Nátěry se na model aplikují pomocí nástřiku, namáčení, nátěrem nebo poléváním. U metody vypařitelného modelu je povlakování klíčovou technologií, jelikož je to jeden z faktorů, který ovlivňuje průchodnost plynů. Nátěr se provádí přímo na polystyrenový model, kde hlubší vniknutí, na rozdíl od nátěrů u běžných metod, je spíše negativním jevem, jelikož je polystyrenový materiál přijímá vlhkost velmi intenzivně. Právě toto je příčinou toho, že nátěry určené pro tento materiál mají vždy vyšší hustotu. Tento typ nátěru musí na povrchu modelu dokonale přilnout. Nátěr nesmí být příliš tenký, ale je zde nežádoucí i tlustá vrstva, kvůli vznikajícímu praskání nátěru nebo špatné propustnosti plynů. V prvních etapách zavádění výroby odlitků metodou vypařitelného modelu se používaly nátěry především od



Obr. 17 Nátěr modelu [21]

renomovaných zahraničných firem. V nasledujúcich letech se typy nátěrů v závislosti na kvalitě a ekonomické stránce výrobku ustálili na základní typy

Mezi tyto typy patří:

- Kokso-grafitové jsou nátěry vhodné pouze pro menší tepelné zatížení. Při delší časové zátěži je nutná širší vrstva nátěru (až 3 mm).
- Aluminosilikátové vodní nátěry jsou vyvíjeny speciálně pro metodu vypařitelného modelu. Velikost zrn při obsahu 65 % pevných elementů je větší jak 20  $\mu\text{m}$ .
- Zirkonové nátěry vykazující odolnost nátěru při vyšší tepelné zátěži již při tloušťce nátěru 0,5 mm. Tyto nátěry mají méně izolující vlastnosti oproti grafitickým nátěrům.

Běžně využívané jsou 2 typy nosných kapalin-voda a líh. Exponovaná místa, jako jsou různé kapsy, otvory, záhyby apod., se natírají dvakrát, kdy se první nátěr provádí pouze na exponovaná místa a druhý nátěr je udělám na celé ploše modelu. Vrchní vrstva musí být z důvodu propustnosti plynu v co nejtenčí vrstvě. Takto natřený model se před ukončením sušení kontroluje, zda se neobjevují praskliny nebo se nezačíná loupat barva a odstraňují se zjevné vady. Optimální sušení při použití vodních nátěrů vyžaduje cirkulaci suchého vzduchu o teplotě mezi 40 a 50  $^{\circ}\text{C}$ , čímž je zaručeno rovnoměrné sušení. Vyšší přehřátí může způsobit deformaci polystyrenového modelu.



Obr. 18 Vysoušení nátěru [16]

## 1.2 Formování [2,11,14,22]

Formování je další důležitou technologií z hlediska propustnosti plynů, která je u této metody důležitým aspektem. Právě dle technologie formování, lze rozlišit tento proces na několik metod, kdy jednou z nich je formování bez následného vyjmutí polystyrenového modelu, kde se forma vyrábí z vázané nebo samotvrdnoucí směsi klasickými postupy formování. Mezi důležité vlastnosti formovacích směsí patří tekutost, spěchovatelnost, formovatelnost a zbytková pevnost ovlivňující rozpad formy. Z pohledu vlastností se používají zejména směsi II. generace využívající chemizace v procesu propojení pomocí organických pojivových systémů. Směsi s organickými pojivy, jako jsou furanová pojiva, mají vysokou pevnost po vytvrzení a nízkou teplotu termodestrukce. U této metody se k vytvoření dutiny vkládají do modelu písková jádra a model je následně odstraňován postupným zplyněním tmelem, vyvolaným postupujícím tekutým kovem. Tento postup formování je vhodný pro malosériovou nebo



Obr. 19 Formování s pojivy [22]

kusovou výrobu. Plyny vzniklé při odlévání odcházejí průchody a nálitky do pracovního prostředí, čímž zhoršují jeho kvalitu.

Za tímto účelem vznikla druhá metoda, u které se model z formy vytahuje a umožňuje tak opětovné použití nebo rozřezání a zničení. Zde, se jako v předešlém případě používá vytvrditelná formovací směs. Výhodou užití polystyrenového modelu namísto dřevěného je, že může mít menší úkosy. Dále může být použit méně kvalitní polystyren z hlediska zplyňování. Tvorba dřevěného modelu se vyplatí až při výrobě více kusů, z důvodu větší trvanlivosti modelu. Tato metoda se využívá i z důvodu zabránění povrchového nauhličení oceli uhlíkovými produkty, vznikajícími při spalování, u nízkouhlíkatých ocelí. Využití můžeme najít především u rozměrově velkých kusových odlitků, jako jsou lisovací a kovací nástroje nebo některé části výrobních strojů.

Další způsob formování je podobný první metodě, ale místo užití vazné nebo samotvrdnoucí směsi se používá suchý písek bez pojiv nebo kovové broky. U kovových broků se používá postup magnetického formování, který je ovšem méně rozšířený. Předností této metody je řízené tuhnutí a vysoká rychlost ochlazování. Zhuštění broků se dosahuje pomocí působení magnetických sil. Po odlévání a tuhnutí se magnetické pole zruší a odlitek je vytažen překlopením kontejneru. Broky se po ochlazení vrací zpět do cyklu k opětovnému použití.

Nejvíce rozšířeným způsobem formování polystyrenových modelů je formování do suchého písku bez pojiv. Pěchování se provádí pomocí vibrací, čímž jsou vyplněny všechny dutiny a záhyby modelu. Mezi nedostatky této metody patří riziko zborcení modelu při silné vibraci, a naopak při slabé může nastat nedostatečné vyplnění všech dutin. Vhodným pískem užívaným k formování je křemenný písek s nízkou nebo střední zrnitostí z důvodu dobré prodyšnosti, která je z důvodu průchodu plynů stěžejní pro spalování modelu tekutým kovem. Odstranění odlitku z formy je velmi jednoduché, kdy se formovací rám pouze překlopí. Písek se po použití a vysypání z rámu chladí a opět používá. Mezi výhody této metody patří vysoká pružnost výroby, odstranění klasického formování, nízké investiční náklady pro velkosériovou výrobu odlitků, odstranění výroby jader, větší možnost automatizace a robotizace výroby, bezpojivový systém formy, znovupoužití písku a jeho vysoké využití a snadné vyjmutí odlitků z formy.



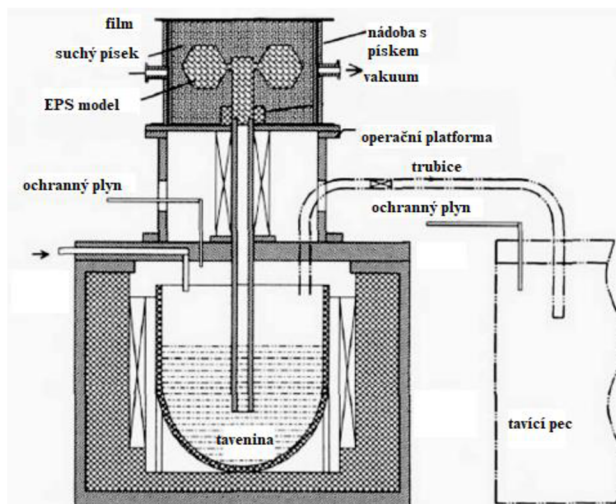
Obr. 20 Formování bez pojiv [11]

### 1.3 Moderní technologie využívané při lití metodou vypařitelného modelu

Technologie lití metodou vypařitelného modelu je poměrně moderní technologií, proto se proces lití neustále vyvíjí a mění v závislosti na kvalitě výsledného odlitku, kde se klade čím dál větší důraz na kvalitu a jakost, tak na výsledné náklady procesu. Samotná technologie se tak stává stále sofistikovanější.

### 1.3.1 Lití pod vakuem a za nízkého tlaku [3,5]

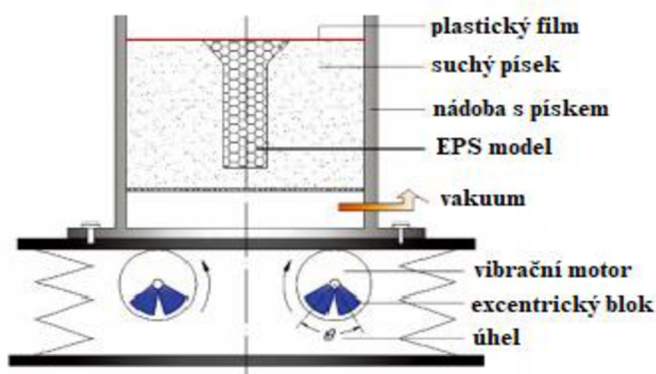
Proces kombinuje běžnou metodu lití vypařitelného modelu a nízkotlaké lití. Uplatňuje se zde kombinace výhod obou těchto metod lití. Plnicí schopnosti roztaveného kovu jsou jednoznačně zlepšeny, protože plnění je dokončeno za řízeného tlaku. Ve srovnání s tlakovým litím, u kterého je využito metody v tlačení kovu do formy, je tato metoda méně nákladná. Odlitky mohou být dále tepelně upravovány ke zvýšení jejich houževnatosti. Další výhodou je opravdu velká rozměrová přesnost a hladší povrch v porovnání s litím do pískové formy. Jelikož se zde nachází kratší délka celého systému, je tím zamezeno větší ztrátě tepla. Proti působení gravitační síly, skrze zkrácený systém a sníženou tepelnou ztrátu před výměnou vzorků polystyrenových modelů, je možná i výroba odlitků ze slitin s nízkým obsahem tepla. Ve velkém množství mohou být vyráběny téměř tvarově čisté odlitky s velkou účinností a relativně nízkou cenou. Tavenina se plní za působení proti gravitačním sil s dobrou kontrolou za nízkého tlaku. Odlévání tohoto typu je vhodné pro lití mnoha neželezných slitin. Odlitek získaný pomocí této metody má více integrovaný tvar a čisté linie. Je zde vidět, že lití touto metodou má významnou výhodu ve srovnání s běžným gravitačním litím.



Obr. 21 Schéma technologie lití pod vakuem a za nízkého tlaku [3]

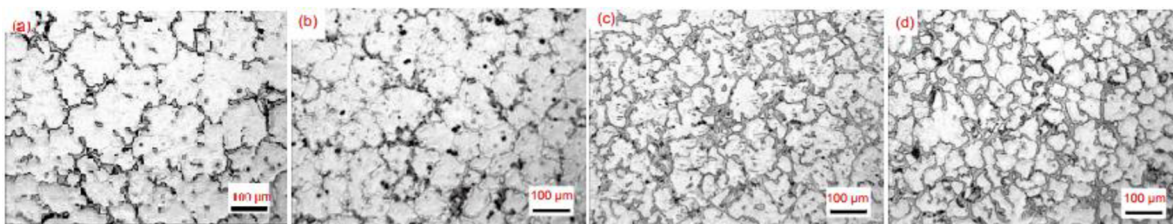
### 1.3.2 Tuhnutí za působení vibrací [3,5]

Během procesu tuhnutí se využívá mechanických vlastností vibrací. Vibrační energie vyvolává nucené proudění v odlité tavenině. Tyto vyvolané vibrační proudy vytvářejí vnější síly působící na dendritická ramena ve směru proudění. Výsledkem je snadné rozdělení či ulomení dendritických ramen, které jsou silovým prouděním vedeny objemem taveniny, působící jako nový zárodek pro nové zrno. Při dalším oddělení se rychlost nukleace zvyšuje, pomocí čehož se struktura zjemňuje, což vede ke zlepšení mechanických vlastností odlitků. Následkem toho má lití na metodou vypařitelného modelu za vibračního tuhnutí potenciál být jednoduchou, ekonomickou a efektivní metodou. Na obrázku 23 je zobrazen efekt vibrací během tuhnutí na



Obr. 22 Schéma technologie tuhnutí za působení vibrací [3]

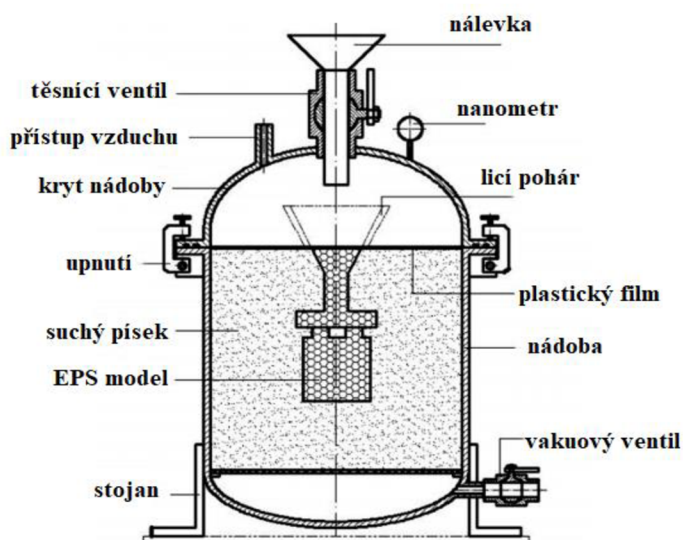
mikrostruktury při lití slitiny hořčíku AZ91. Z obrázku 23 je patrné, že velikost zrn slitiny se při zvětšující amplitudě postupně snižuje.



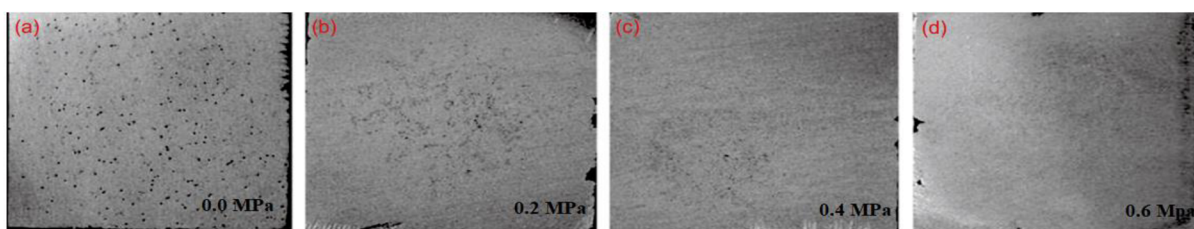
**Obr. 23** Ukázka slitiny a) bez vibrací b) 50 Hz, 0.11 mm vibrace c) 50 Hz, 0.23 mm vibrace d) 50 Hz, 0.34 mm vibrace [3]

### 1.3.3 Tuhnutí za působení tlaku [3,5]

Lití metodou vypařitelného modelu s tuhnutím za působení tlaku kombinuje klasické lití touto metodou a technologií tuhnutí pod tlakem. Tato metoda tuhnutí může vést ke zvýšení hustoty a zlepšení mechanických vlastností, stejně jako ke snížení tvorby defektů a smrštění odlitků. Již při jedné z prvních forem této technologie lití na výrobu hliníkových odlitků a jejich slitin, se kterou přišla společnost The Vulcan, odolnost odlitků vzrostla o 50 % a míra smrštění se snížila z 0,75 % na 0,01 %, oproti běžné metodě tuhnutí. Náklady jsou ovšem, kvůli vysokému tlaku použitého plynu, který může dosahovat až 10 atmosfér, vysoké. Huazhong University of Science and Technology vynalezla zařízení a metodu (obr. 24), určené na lití metodou vypařitelného modelu s tuhnutím za působení tlaku pro hliníkové a hořčíkové slitiny. Tato metoda funguje tak, že kov je vléván do tlakové nádoby s pískem, která se následovně rychle utěsní a naplní se plynem, v důsledku čehož je tuhnutí roztaveného kovu dokončeno pod tlakem. Výhody této technologie jsou v jednoduchém vybavení na provedení procesu, nízké náklady a podstatně nižší tlak užitý při tuhnutí. Tlakové tuhnutí zvyšuje precipitační tlak vodíku, který brání vzniku děr. Obrázek 25 zobrazuje vliv tlaku při tuhnutí na tvorbu děr u slitin hliníku. Lze vidět, že tvorba děr je výrazně snížena a hustota odlitku se podstatně zvětšila.



**Obr. 24** Schéma tuhnutí za působení tlaku [3]

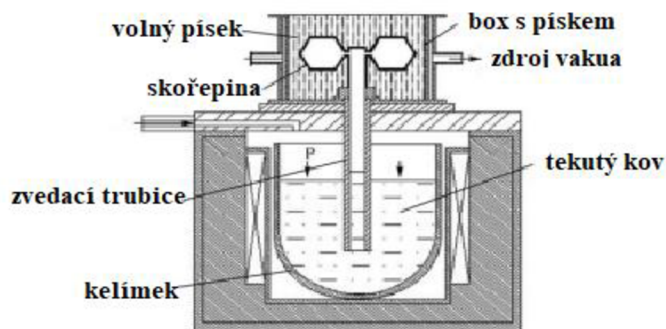


**Obr. 25** Tlak a) 0 MPa b) 0,2 MPa c) 0,4 MPa d) 0,6 MPa [3]

### 1.3.4 Odlévání vypařitelných skořepin za působení vakua a nízkého tlaku [3,5]

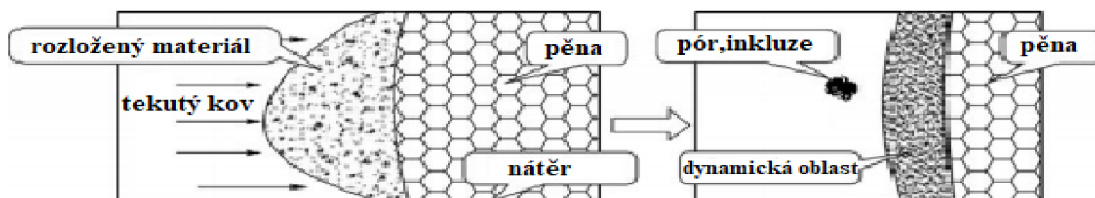
Tato metoda kombinuje technologii dvou metod odlévání, kterými jsou lití pomocí vypařitelného modelu a preciznost výroby keramických skořepin u metody lití pomocí vytavitelného modelu, spolu s litím ve vakuu a za nízkého tlaku.

Technologie spočívá v tom, že jako první se vyrábí polystyrenový model, na který je později nanášena tenká keramická skořepina, technologií stejnou, jako při lití pomocí vytavitelného modelu. Při procesu se využívá především aluminosilikát, jako prášek, a oxid křemičitý jako pojivo. Poté, co je při vytvrzení skořepiny polystyrenový model spálen, nastává plnění kovem a následné tuhnutí za působení podtlaku.



Obr. 26 Schéma lití pomocí vypařitelných skořepin za vakua a nízkého tlaku [5]

Obrázek 26 zobrazuje schéma této technologie. Tato metoda má spoustu výhod, zahrnující velkou flexibilitu návrhu modelu, nízké náklady, velkou přesnost skořepiny a skvělou tvárnost. Obecně platí, že polystyrenový model využitý při metodě lití pomocí vypařitelného modelu vytváří velké množství plynů během procesu lití. S tím souvisí vyskytující se poruchy, jako je porucha vzniku pórů, nastávající, pokud plyny, vytvořené při



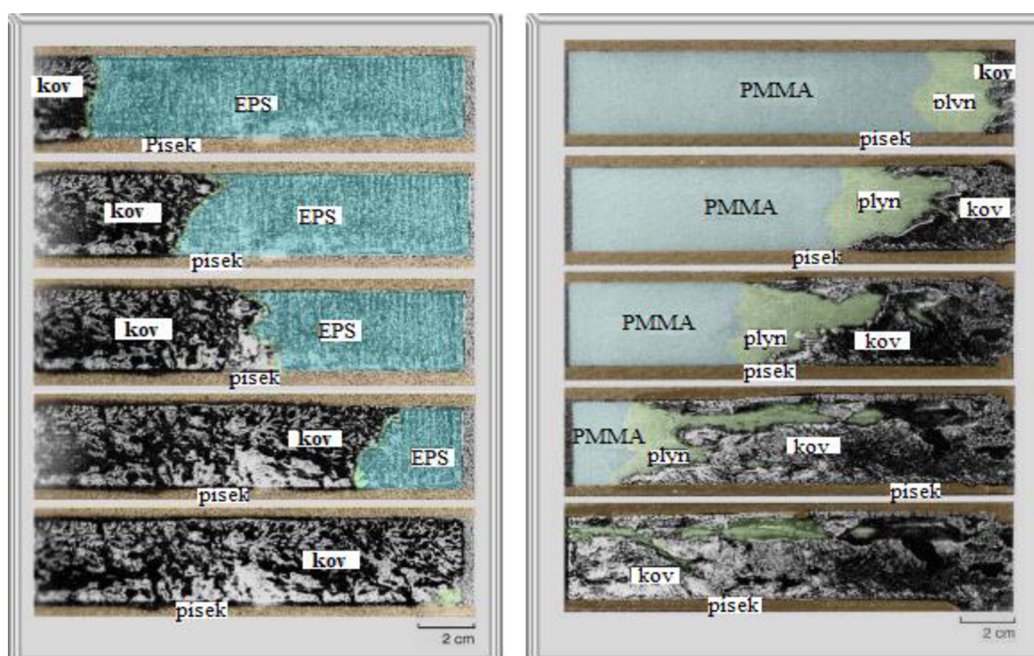
Obr. 27 Schéma postupujícího tekutého kovu [5]

spalování modelu, nemohou v dostatečném množství unikat skrze vrstvu nátěru nebo zbytky rozloženého modelu, které mohou vést k inkluzi. Inkluze strusky a pórové poruchy vznikající v důsledku spalování modelu, jsou zde zcela vyloučeny, z důvodu jeho odstranění již při vytvrzování skořepiny. Odlitky získané při užití této metody odlévání mají vyšší hustotu. Dále je také eliminována oxidace hliníkových a hořčíkových slitin. Odlévání, za použití této technologie, se také vyznačuje nižší užitou teplotou, ve srovnání s klasickou metodou vypařitelného modelu.

## 1.4 Vady odlitků [2,7]

Při lití kovu do formy s polystyrenovým modelem, se model postupně spaluje a vznikající páry procházejí přes žáruvzdorný nátěr a do formovací směsi. Kov zde postupně nahrazuje model a mezi tekutým kovem a polystyrenovým modelem se akumuluje vrstva plynů. Tlak těchto plynů pak udržuje tvar formy, což znamená že při přerušení lití by mohlo dojít ke

zborcení formy. I přes to, že mechanické vlastnosti odlitků vytvořených metodou vypařitelného modelu jsou téměř stejné, jako při výrobě odlitků s kokilami obsahující písková jádra, mohou na povrchu vznikat povrchové vady s charakteristickým zvrásněním, které vyvolávají shluky lesklých uhlíků vznikajících z rozkladu polystyrenu. Tomuto jevu se lze vyhnout použitím materiálu na bázi PMMA. Vznik velkého množství lesklého uhlíku může vést u nízkouhlíkových ocelí k nechtěnému legování povrchových vrstev. Produkty spalování kondenzují v písku po průchodu vrstvou nátěru. Ve srovnání s PMMA tvoří EPS dvojnásobek kondenzátů. Při použití směsi těchto dvou hmot, kdy převládá větší množství EPS vzrostl počet vad, jako jsou zavaleniny, uhlíkový šum apod. Naopak pokud převládá větší množství PMMA zmizí tento typ vad, ale zmetkovitost zůstává vysoká z důvodu křehkosti a deformace modelů nebo praskání nátěru pod tlakem pyrolýzy. S každým podílem PMMA ve hmotě modelu roste doba plnění. S vyšší plynatostí hmoty modelu roste doba plnění formy. Vzhledem k zabránění vzniku uhlíkových vad lze použít modely z hmoty PMMA, ale u tlustostěnných odlitků je lepší upřednostnit EPS pro nižší vývin plynů, pomocí čehož je dosaženo přesnějšího tvaru.

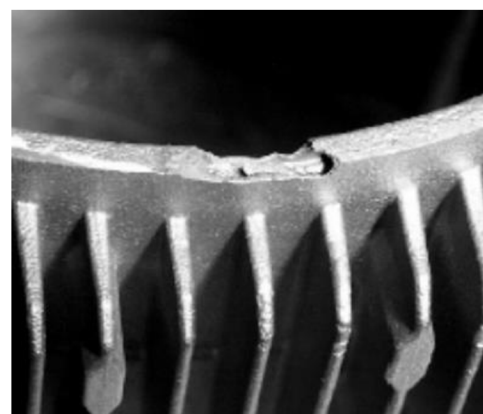


Obr. 28 Postupující kov model z hmoty EPS a PMMA [2]

Příklady vad vznikajících touto metodou lití:

- Zahlcený plyn

Nejčastější místo výskytu této vady je obvykle na vodorovné ploše odlitku nebo v jeho horních částech. Hlavní podíl na vzniku této vady má voda, která se může objevit v případě, že byl nátěr nedostatečně vysušen. Voda se zde může vyskytnout i z okolí, při vysoké vlhkosti vzduchu. Vodní pára je důvodem vzniku protitlaku, přičemž nátěr není schopen v dostatečné míře převádět produkty degradace do formovací směsi.



Obr. 29 Zahlcený plyn [2]

- Penetrace

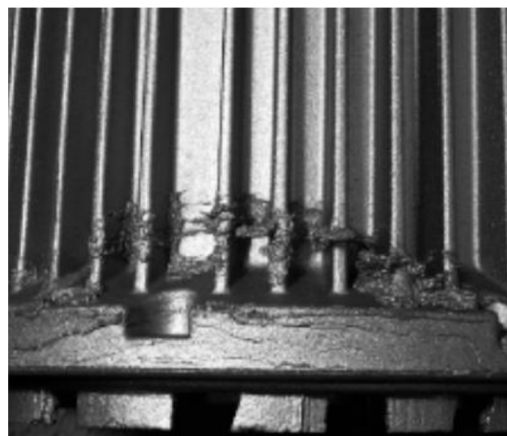
Penetrace vzniká v místech tepelně exponované části odlitku, jako jsou různé záhyby a dutiny. Dalším místem, kde se tato vada vyskytuje jsou spodní části odlitku nebo plochy opatřené příliš tenkým nátěrem. Za vznikem penetrace může taky stát špatně zhuštěný formovací materiál.



Obr. 30 Penetrace [2]

- Utržení odlitku

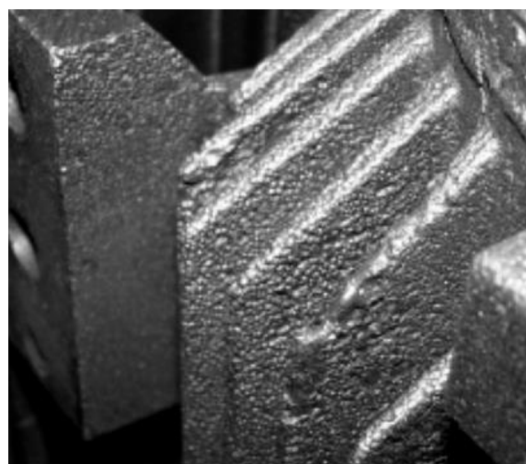
Markantní rozdíl nastávající mezi objemovou hmotností polystyrenu a použitého kovu nebo nedostačující vrstva formovací směsi, která se nachází nad modelem, může způsobit odtržení částí odlitku vlivem metalostatického tlaku. Extrémním případem této vady je „vyplování“ částí odlitku na povrch formovací směsi. Vzniku této vady lze zamezit širší vrstvou formovacího materiálu nad odlitkem.



Obr. 31 Utržení odlitku [2]

- Řídký povrch

Řídký povrch vzniká z důvodu nesprávně vypěněného polystyrenového modelu. Nátěr, který se při této metodě lití používá, zateče při jeho nanášení do míst mezi jednotlivé kuličky materiálu. Tento nátěr zabrání tekoucímu kovu ve vyplnění těchto prostor.



Obr. 32 Řídký povrch [2]



## 2 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce bylo prakticky ověřit a zkusit vyrobit vlastní odlitek dle vlastního výběru za pomoci technologie vypařitelného modelu. Odlitek byl vyroben ve fakultní slévárně VUT Brno-FSI.

### 2.1 Výroba modelu

Z důvodu velké náročnosti výroby polystyrenového modelu, který je běžně v průmyslu vyráběn pomocí speciálně vyvinutého zařízení, jako jsou vypěňovací formy, speciální obráběcí nástroje nebo méně sofistikované ruční nástroje typu, tavný drát nebo nahřátá čepel, byl model zakoupen. Zakoupený model nebyl vyvinut za účelem užití k výrobě odlitků metodou vypařitelného modelu, ale jelikož se jedná o zkušební odlitek, který slouží pouze, jako těžítka a jeho hlavním smyslem je prohloubení vlastních znalostí této technologie, je více než vyhovující. Polystyrenový model má tvar přibližně 160 mm vysokého sněhuláka.



Obr. 33 Polystyrenový model sněhuláka

### 2.2 Formování modelu

Při formování se postupovalo obvyklým způsobem využívaným u lití za této technologie, jak je popsáno výše v práci. Polystyrenový model byl prvně opatřen nátěrem, pomocí namáčení v lázni se zirkonovým nátěrem, po kterém nastalo vysoušení. Tento nátěr byl odstraněn pouze v místě, kde byla následně umístěna vtoková soustava, tvořená ze stejného materiálu, jako je samotný model. Sama vtoková soustava se dále již nátěrem neopatrovala. Připravený model s vyschlým nátěrem na povrchu se společně s vtokovou soustavou a nálitkem (obr. 35a) zaformoval do slévárenských kovových rámců s využitím samotuhnoucí formovací směsi-alphaset, kde ostřivem je křemičitý písek (0,31mm), pojivem je fenolická pryskyřice a tvrdidlem je látka na bázi esteru. Postup při formování ukazují obr. 35b a 35c. Z hotové formy se vyjmuly jen dřevěné části vtokové soustavy a polystyren byl ponechán uvnitř, neodstraňoval se. Po složení formy se vršek se spodkem zajistil sešroubováním a takto připravená forma byla následný den odlita.



Obr. 34 Nanášení nátěru a sušení



**Obr. 35** a) Sestava modelu b) průběh formování c) formování vršku formy

## 2.3 Odlévání modelu

Z důvodu časových i ekonomických bylo odlévání přiřazeno k jedné z taveb, které v tom čase probíhaly. Materiálem pro lití těžítka byla duplexní ocel, jejíž struktura se vyskytuje ve dvou fázích, kterými jsou ferit a austenit. Dosažení poměru dvou fází se provádí pomocí legování při její výrobě, kdy je přidán chrom, molybden, nikl a dusík. Právě pomocí užití těchto prvků se dosahuje vynikajících mechanických vlastností a zároveň dobré antikorozi odolnosti, což je hlavním důvodem jejich výroby. Takto kvalitní a drahý materiál a by za normálních okolností na výrobu obyčejného těžítka nebyl použit. Za jiných okolností by volba materiálu padla na litinu s lupínkovým grafitem, přičemž by odpadla nutnost přidání nálitku. Zde ovšem pro eliminaci staženiny byl využit. Tavení materiálu bylo provedeno v elektrické vakuové indukční peci, která se nachází ve slévárně fakulty FSI při VUT Brno. Po odpichu, do předehřáté lící pánve, bylo nutné pracovat velmi rychle, protože tekutý kov rychle chladne. Při samotném lití došlo k poměrně bouřlivé reakci (obr. 37),



**Obr. 36** Odlévání

která byla zapříčiněna velkou kumulací tlaků od plynu, který se vytvořil při rozkladu hmoty modelu. Po lití probíhalo několika hodinové tuhnutí ve formě.



**Obr. 37** Reakce plynů, vznikajících z polystyrenového modelu

## 2.4 Dokončovací práce

Po úplném zchlazení byl odlitek odstraněn z formy pomocí působení vibrace. Takto zpracovaný odlitek bylo nutné očistit. Čištění odlitku bylo provedeno tryskáním písku. Po očištění odlitku bylo potřeba odstranit vtokovou soustavu a nálitek pomocí řezných nástrojů a samotné řezy vhodně upravit a zabrousit.



**Obr. 38** Odlitek a vtoková soustava s nálitekem před a po otryskání



**Obr. 39** Výsledný odlitek po odstranění vtokové soustavy a nálitku

Výsledný experimentální odlitek v podobě 160 mm vysokého a 4,4 kg těžkého těžitka, tvaru sněhuláka, lze hodnotit, jako vyhovující. Pomocí lití metodou na vypařitelný model bylo dosaženo i sebemenších detailů modelu, jako jsou oči sněhuláka nebo jeho úsměv. Dokonce i povrchová struktura materiálu modelu je zřetelně rozeznatelná. Je nutno podotknout, že takto přesně popsaná struktura polystyrenových kuliček není u průmyslových odlitků, vyráběných touto metodou, běžná a ani přípustná. Zde, bylo této struktury dosaženo z důvodu použitého polystyrenového modelu, který nebyl určen pro odlévání. Nicméně pro účel odzkoušení této technologie a pro jeho využití, jakožto pouhé těžitko, byl tento model dostačující.

### 3 ZÁVĚRY

Cílem této bakalářské práce bylo, na základě literárních studií, kompletně prozkoumat technologii lití metodou vypařitelného modelu a pomocí této technologie vytvořit odlitek, dle vlastního uvážení. První část práce se zabývá problematikou výroby odlitků touto metodou v celém jejím rozsahu. Dále bakalářská práce popisuje výrobu experimentálního odlitku. Byl zvolen odlitek tvaru sněhuláka, který bude sloužit, jako těžítka. Výsledný odlitek lze hodnotit, jako vyhovující. Pomocí této metody lití bylo dosaženo všech detailů polystyrenového modelu, dokonce i struktura povrchu modelu je na odlitku jasně znatelná. Použitím duplexní oceli bylo dosaženo toho, že vytvořený odlitek má antikorozi vlastnosti. Lití metodou vypařitelného modelu je technologie, která dostává ve slévárenském průmyslu stále více prostoru. Metodu lze použít pro rychlou a méně nákladnou výrobu prototypů, ale stejně dobré využití lze najít u sériové výroby. Další výhodou, která staví tuto metodu do popředí, je možnost výroby velké rozmanitosti tvarů odlitku a možnost vyrábět odlitky od nejmenších velikostí po ty největší. Právě díky rozsáhlým možnostem metody, lze hledat uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, jako je především automobilovém, kde se metoda využívá například pro kusovou výrobu částí lisovacích zařízení nebo přímo pro sériovou výrobu odlitků motorů. Využití je možno najít i při výrobě uměleckých odlitků. Spolu s možností využít při odlévání širokou škálu železných nebo neželezných kovů, je nutné s touto metodou do budoucna stále více počítat, jako s vhodnou alternativou pro nynější běžné způsoby výroby odlitků.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. Technologie slévání. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006, 175 s.: il. ISBN 80-7043-491-0.
- [2] ELBEL, T. Speciální metody výroby odlitků. Studijní opora. FMII.VŠB-TU Ostrava, 2008, 95 s.
- [3] FAN, Zt, Wm JIANG, Fc LIU a Bt XIAO. Status quo and development trend of lost foam casting technology. China Foundry [online]. FOUNDRY JOURNAL AGENCY, 2014, **11**(4), 296-307 [cit. 2018-02-14]. ISSN 1672-6421. Dostupné z: <http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/detail/detail?vid=0&sid=283c44c6-fce8-4c25-a1f6-631104065c61%40sessionmgr103&bdata=Jmxhbm9Y3Mmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=97910424&db=a9h>
- [4] CHEN, Hong Ze, Zhong De SHAN a Hong Zhao DONG. Research of Foam Pattern Processing for Lost Foam Casting. Applied Mechanics and Materials [online]. Trans Tech Publications, 2013, **331-331**(331), 600-603 [cit. 2018-02-14]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.331.600. ISSN 1660-9336. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMM.331.600>
- [5] JIANG, Wenming a Zitian FAN. Novel technologies for the lost foam casting process. Frontiers of Mechanical Engineering [online]. Beijing: Higher Education Press, 2018, **13**(1), 37-47 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1007/s11465-018-0473-2. ISSN 2095-0233. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s11465-018-0473-2>
- [6] JUŘIČKA, I. a O. NOVOTNÝ. Specifika technologie výroby odlitků litých na spalitelný model. Slévárenství. 2005, **LIII**(4), 169-173. ISSN 0037-6825.
- [7] Making of pattern. In: Lostfoamcouncil [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://lostfoamcouncil.de/the-process-sequence.html>
- [8] EPS. In: Vegoilguy [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://www.vegoilguy.co.uk/lost\\_foam\\_casting.php](http://www.vegoilguy.co.uk/lost_foam_casting.php)
- [9] Cover pump. In: Storopack [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.storopack.ch/en/products-solutions/technical-molded-parts-made-of-eps-epp-and-neopor/lost-foam.html>
- [10] Odlitek raznice. In: Tamico [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.tamico.or.kr/data/prod/sehaw6.jpg>
- [11] Formování. In: Slideshare [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/viet4777/lost-foam-cast-process>
- [12] Model a odlitek. In: Belpg.com [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.belpg.com/oborudovanie/lite-po-gazifitsyruemym-modelyam>
- [13] Spalitelné modely. In: Knauf-industries-solutions [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.knauf-industries-solutions.com/calages-automobiles/lost-foam.html>

[14] Lost foam-výroba odlitků metodou spalitelného modelu. In: Streamtech.tv [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.streamtech.tv/video-108-lost-foam-vyroba-odlitku-metodou-spalitelneho-modelu.htm>

[15] Schéma technologie. In: Buntmetall [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://www.buntmetall.at/mediaPool/content/media/aktuelles/pressebilder/lost\\_foam\\_giessanlage/150123BannerLostFoam2015GSW-Ru.jpg](http://www.buntmetall.at/mediaPool/content/media/aktuelles/pressebilder/lost_foam_giessanlage/150123BannerLostFoam2015GSW-Ru.jpg)

[16] Drying. In: Evergreen [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://www.qd-evergreen.com/OEM-Iron-Lost-Foam-Casting-for-Engine-Parts\\_1158.html](http://www.qd-evergreen.com/OEM-Iron-Lost-Foam-Casting-for-Engine-Parts_1158.html)

[17] CNC. In: Contactscale [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.contactscale.com/>

[18] Hotwirefoamcutter. In: Demandproducts [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.demandproducts.com/OWA/Product/Details/HCM3S/001/-/precision-model-makerhot-wire-table1-nwmanix-wire-in-harp>

[19] Hot knife foam cutter. In: Hotwiresystem [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.hotwiresystems.com/>

[20] Mining Parts Foam. In: Modtek [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://www.modtek.com/Lost-Foam-Castings\\_1.html](http://www.modtek.com/Lost-Foam-Castings_1.html)

[21] Coating. In: Lost foam [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://www.lostfoam.com/content/learning\\_center/presentations-lost\\_foam\\_casting\\_process.php](http://www.lostfoam.com/content/learning_center/presentations-lost_foam_casting_process.php)

[22] Formování se směsí. In: Ashermade [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://ashermade.com/2009/11/25/lost-foam-casting/>