



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# PŘEHLED APLIKACÍ ODLITKŮ ZE SLITIN ŽELEZA A ZE SUPERSLITIN VYROBENÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU

SURVEY OF APPLICATIONS OF INVESTMENT CASTING FROM FERROUS ALLOYS AND SUPER-ALLOYS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Smilovský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **David Smilovský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**  
Akademický rok: 2015/16

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:

## **Přehled aplikací odlitků ze slitin železa a ze superslitin vyrobených metodou vytavitelného modelu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Získání přehledu o možných aplikacích odlitků ze slitin železa a ze superslitin zhotovených metodou vytavitelného modelu v různých průmyslových odvětvích

### **Cíle bakalářské práce:**

Získání přehledu o možných aplikacích odlitků ze slitin železa a ze superslitin zhotovených metodou vytavitelného modelu v různých průmyslových odvětvích

### **Seznam literatury:**

Beeley, PR., Smart, RF. (1995): Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 486 p. ISBN 0 901716 66 9.

Campbell, J. (1991): Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 288 p. ISBN 0 7506 1072.

Horáček, M. (2001): Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství, č. 10, s. 570 –580. ISSN 0037-6825.

Horáček, M. (2009): Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry, Proceedings of the World Technical Forum, Brno 1st – 3rd June

Horáček, M., Cileček, J. (2007): Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets”, Foundry Trade Journal, U.K., Volume 180, Nr. 3641, pp.32-35

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Obsahem této bakalářské práce je literární rešerše, která přináší přehled používaných aplikací odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu z konkrétních slitin. Uvedeno je shrnutí metody s popisem jejího základního principu a možností. Dále pak práce obsahuje metalurgický popis železných slitin a superslitin odlévaných touto metodou. Zaměření je na jednotlivé průmyslové odvětví, ve kterých jsou takto vyrobené přesné odlitky aplikovány. Uvedeny jsou konkrétní příklady součástí od různých českých i zahraničních sléváren.

### **Klíčová slova**

vytavitelný model, aplikace odlitků, slitiny železa, superslitiny

## **ABSTRACT**

A content of this thesis is a survey of casting applications from specific alloys manufactured by investment casting. Thesis shows basic principles of investment casting method, its possibilities and advantages. It also lists a short metallurgical description of ferrous alloys a superalloys cast by this method. The main aim is on specific industrial branches, where these precise castings are used. There are specific applications of parts presented from various Czech and foreign foundries.

### **Keywords**

investment casting, castings applications, ferrous alloys, superalloys

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SMILOVSKÝ, D. Přehled aplikací odlitků ze slitin železa a ze superslitin vyrobených metodou vytavitelného modelu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 23. 5. 2016

---

David Smilovský

## **Poděkování**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

# OBSAH

ABSTRAKT .....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 TECHNOLOGIE LITÍ NA VYTALITELNÝ MODEL.....	9
1.1 Historie vytavitelného modelu .....	9
1.2 Princip metody .....	10
1.2.1 Voskové modely .....	11
1.2.2 Výroba keramické formy .....	13
1.2.3 Odlití kovu .....	15
1.2.4 Vyjmutí z formy a dokončení .....	15
1.3 Rozměrová přesnost .....	15
1.4 Světová výroba odlitků .....	16
2 SLITINY ŽELEZA.....	17
2.1 Metalurgie železných slitin .....	17
2.2 Aplikace slitin železa odlévaných metodou vytavitelného modelu .....	23
2.2.1 Automobilový a dopravní průmysl .....	23
2.2.2 Letecký průmysl .....	25
2.2.3 Všeobecné strojírenství.....	26
2.2.4 Energetika a těžební průmysl.....	27
2.2.5 Zbrojní průmysl .....	28
2.2.6 Sportovní a volnočasové použití.....	28
3 SUPERSLITINY .....	29
3.1 Metalurgie superslitin.....	29
3.1.1 Niklové superslitiny .....	29
3.1.2 Kobaltové superslitiny .....	32
3.2 Aplikace superslitin odlévaných metodou vytavitelného modelu .....	33
3.2.1 Letecký průmysl .....	33
3.2.2 Energetika .....	36
3.2.3 Automobilový průmysl .....	37
3.2.4 Biomedicína .....	37
ZÁVĚR .....	38
Seznam literatury .....	39

## ÚVOD [1],[2],[3]

V 21. století jsou nároky na výrobu součástí a nástrojů velmi vysoké. Je snaha o výrobu konstrukcí s co nejnižší hmotností, co nejbližší svým tvarem k požadovanému a s co nejnižšími náklady na výrobu při zachování co nejlepších mechanických vlastností.

Jednou z možných technologií přesné výroby odlitků je lití na vytavitelný model. Tato technologie byla jednou z prvních technologií výroby forem pro odlitky. Moderní technologie se však již od původní rozvinula tak, že s původní jsou si podobné snad už jen názvem. Došlo u ní k velkému technologickému pokroku a tento trend, díky narůstající poptávce po odlitcích vyrobených vytavitelným modelem, roste.

Dnešní takto odlévané slitiny dosahují velmi dobrých vlastností díky své čistotě a také znalostem jejich zpracování. Důležité jsou, jako pro většinu odvětví, odlitky ze železných slitin, především z oceli. Ty zaujímají značnou část trhu s přesnými odlitky a svými vlastnostmi jsou mnohdy nenahraditelné.

Avšak kvůli pokroku dochází v posledních 80ti letech k vývoji nových slitin schopným odolávat vysokému teplotnímu zatížení. Tyto slitiny jsou obecně známé jako superslitiny. Pro technologii vytavitelného modelu jsou velmi důležité, protože se odlévají výhradně takto.



Obr. 1 Ukázka technologie vytavitelného modelu [12],[13],[14]



# 1 TECHNOLOGIE LITÍ NA VYTALITELNÝ MODEL [1],[4],[5]

Technologie lití na vytavitelný model (z angl. investment casting) někdy také přesné lití je způsob odlévání kovu do netrvalé formy. Tato metoda umožňuje produkci odlitků vysoké jakosti povrchu, rozmanitostí tvarů a rozměrů. Díky tomu lze vyrábět odlitky s vysokou přidanou hodnotou, jelikož v mnoha případech není potřeba dodatečných úprav rozměrů, které jsou někdy z důvodů kooperační výroby příliš nákladné. Úspory vznikají při samotném dokončování odlitků, kde není potřeba dodatečných úprav konstrukce třískovým obráběním. Takto se spoří jak čas na výrobu, tak především odpadní materiál a energie, které tvoří nemalý podíl ceny součásti.

## 1.1 Historie vytavitelného modelu [2],[3],[4],[6]

Lití na vytavitelný model je jednou z nejstarších forem odlévání kovu vůbec (4-5 tis. let). První nálezy pochází z oblastí jako jsou Mezopotámie, Egypt, Čína, Mexiko, a jiné. Základním materiálem pro tehdejší výrobu modelů byl včelí vosk. Odlévaly se především kovy s nízkou teplotou tavení. Většina těchto odlitků sloužila k náboženským účelům, odlévání podobizen božstev či panovníků, ale také k výrobě šperků a ornamentů.

První text zmiňující přesné lití je z počátku 2. tisíciletí našeho letopočtu od mnicha Theophiluse Presbytera v knize *Schedula diversarum artium* (volně přeloženo jako *Knihy rozmanitých umění*). Tato kniha se stala inspirací pro italského sochaře Benvenuto Celliniho, který ve své autobiografii detailně popsal metodu lití na vytavitelný model při výrobě sochy Persea a Hlavy Medúzy (Obr. 2).

Přesné lití se v průmyslové oblasti začalo využívat až na konci 19. století a to ve stomatologii pro výrobu zubních korunek. Došlo k vývoji nových voskových směsí, nových nanášecích formovacích hmot a také technik odlévání (tlakové lití).

Na začátku 2. světové války vzrůstala ve zbrojním průmyslu poptávka po rozměrově přesných (tzv. near net shape) odlitcích, které by již nebylo potřeba dále obrábět či upravovat. Díky tomu došlo k velkému rozvoji této technologie. Po válce se metoda rozšířila do oblastí komerčního strojírenství.




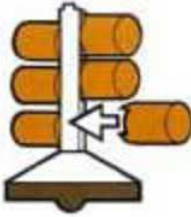

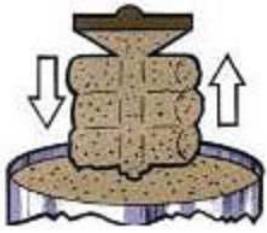
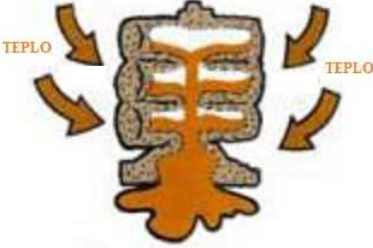
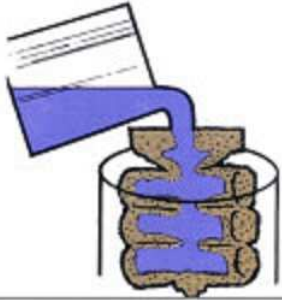


Obr. 2 Socha Persea s hlavou Medúzy [2]

## 1.2 Princip metody [1],[5],[6]

Výroba odlitku litého na vytavitelný model sestává z několika hlavních částí:

- výroby (voskového) modelu
- výroby keramické formy
- odlití kovu
- rozebrání formy a dokončující operace

Schéma postupu výroby odlitku je na *Obr. 3*. Důkladnější rozbor technologie pokračuje na dalších stranách.

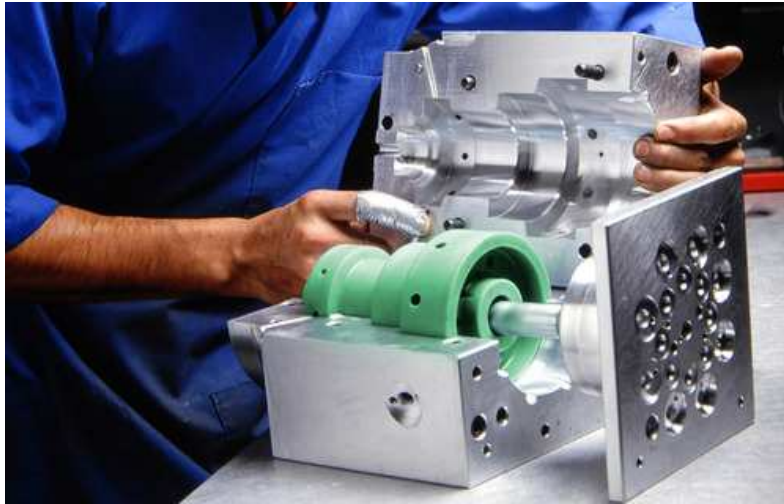
		
<p><b>1. VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU VSTŘÍKNUTÍM DO FORMY</b></p>	<p><b>2. SESTAVENÍ STROMEČKU - PŘILEPENÍ MODELŮ NA VTOKOVÝ KŮL</b></p>	<p><b>3. NAMÁČENÍ MODELU V KERAMICKÉ BŘEČCE</b></p>
		
<p><b>4. POSYP OSTŘIVEM</b></p>	<p><b>5. VYTAVENÍ VOSKU A VYŽIHÁNÍ FORMY</b></p>	<p><b>6. ODLITÍ KOVU</b></p>
		
<p><b>7. VYTLUČENÍ ODLITKŮ Z FORMY</b></p>	<p><b>8. ODŘEZÁNÍ ODLITKŮ Z VTOKOVÉHO KŮLU A OBROUŠENÍ POUVRCHU</b></p>	

*Obr. 3 Postup výroby odlitku metodou vytavitelného modelu [7]*

### 1.2.1 Voskové modely [1],[5],[8]

Základem tvarově a rozměrově přesného odlitku je voskový model. Ten udává tvar a jakost povrchu a je proto zásadní dokonalé zvládnutí jeho výroby. Takovýto model lze vyrobit několika způsoby. Pro sériové výroby se využívají různé typy forem, případně pro vizualizaci návrhu nebo malou sérii lze použít technologii rapid prototyping (v překladu rychlé prototypování) a to jak pro výrobu voskového modelu, tak pro výrobu formy. Například pryžové formy ale také kovové. Forem může být celá řada. Zde jsou popsány některé z nich:

- **Sádrové formy:** Vyrábí se nalitím sádrové hmoty na model. Tyto formy se v průmyslu příliš nevyužívají kvůli špatné teplotní vodivosti a s tím spojené delší době tuhnutí vosku ve formě. Problémem je také velké množství bublin, které ve formě vznikají, a proto je třeba formy vyrábět ve vakuu. Využití naleznou v uměleckém odvětví odlévání, nebo pro velmi malou sérii, kde je výhodou jejich nízká výrobní cena.
- **Pryžové formy:** Jeden ze způsobů výroby formy je umístění modelového zařízení do komory, do které se nalije tekutá pryž, která ztuhne a poté je rozříznuta pro vyjmutí modelu. Podobně jako u sádrových forem i pryžové jsou méně přesné, pomalejší pro manipulaci a mají menší životnost. Naopak jsou ale levné.
- **Pryskyřičné formy:** Mají opět výhodu oproti kovovým formám z hlediska nízké výrobní ceny, krátkým časům na zhotovení a jednoduchosti výroby. Naopak špatně vedou teplo, mají nízkou životnost a mají problém s udržení tvarové přesnosti. Zhotovení spočívá v nalití roztavené pryskyřice na model ze dřeva, plastu nebo jiného materiálu.
- **Žárově stříkané formy:** (Někdy také metalizované formy) Pomocí zařízení podobnému MIG svářečce je stříkána vrstva, většinou zinku, na model ze dřeva, pryskyřice nebo sádry. Výhoda žárového nástřiku je v nízké teplotě při dopadu na povrch. Takovéto formy mají vlastnosti srovnatelné s celokovovými a jsou výrazně levnější. Je však potřeba dodatečně formy upravovat.
- **Celokovové formy:** Používají se především v oblastech kde je zaručena objemná a dlouhodobá produkce součástí, kvůli vysokým výrobním nákladům. Vesměs jsou užívány dva typy forem a to ocelové, nebo hliníkové. Použití záleží na slévárně, jaký materiál preferuje. Vyrábí se z kovových bloků běžnými metodami obrábění. Příklad formy je na *obr. 4*.



Obr. 4 Celokovová forma pro voskový model [8]

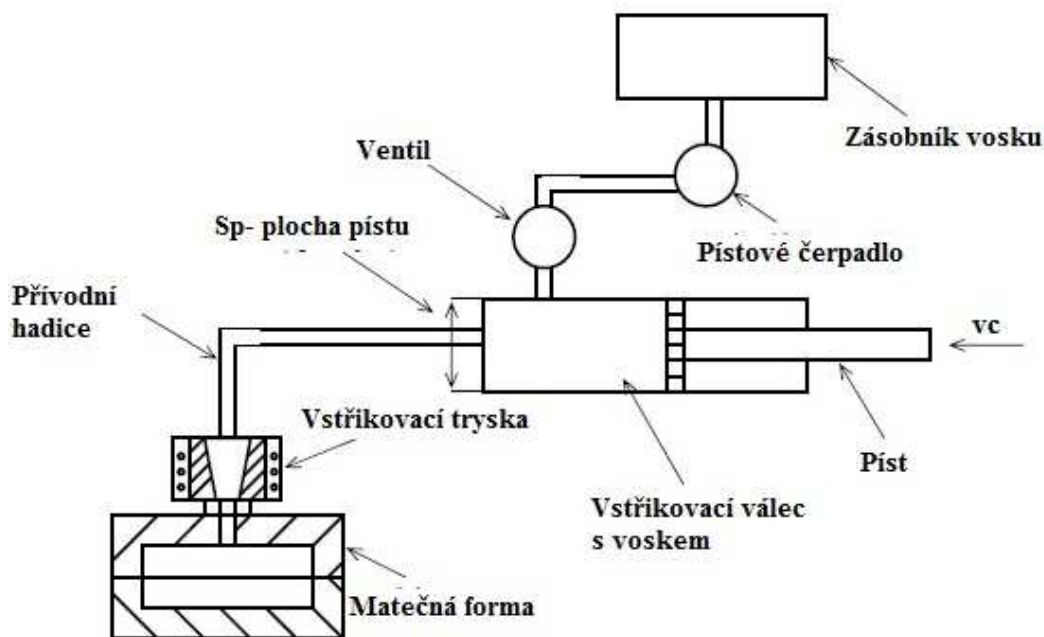
## Vosky

V minulosti byly využívány především vosky včelí, ty však nemohly splňovat vysoké nároky dnešního průmyslu a proto byly nahrazeny složitými směsmi. Jde o komplexní vosky složené z mnoha částí, jako přírodní uhlovodíkové a esterové vosky, syntetické vosky, přírodní a syntetické pryskyřice, organické pojiva a vodu. Správná kombinace složek zajišťuje požadovanou tvrdost, tekutost, roztažnost, teplotu tavení a jiné parametry. Podle použití lze vosky rozdělit do několika základních skupin:

- **modelové vosky** (slouží k samotné výrobě modelu; mají dobré vlastnosti při vstřikování do formy)
- **wosky na nálitky** (používají se pro výrobu vtokových soustav; teplota tavení a viskozita je nižší než u modelových vosků)
- **recyklované vosky** (vosky, které projdou výrobním procesem, mohou být znovu recyklovány a použity jako vtokové či modelové vosky)
- **rekonstituované vosky** (vytavený vosk, který je zbaven přebytečné vody a má upravené složení)
- **speciální vosky** (využívají se k dokončujícím operacím např. na sestavení stromečků, k povrchové úpravě či opravám)

Samotná výroba modelu se zhotovuje dvěma základními metodami a to buď gravitačním litím, nebo vstříknutím do formy. Při gravitačním odlití do formy se vosková směs roztaví na požadovanou viskozitu a odlije se do formy. Tato metoda však není příliš účinná a moc se nevyužívá.

Nejčastěji používané je tzv. vstříknutí do formy, které se provádí na speciálních vstříkolisech (schéma na obr. 5). Vstříkovaný vosk může být trojího typu konzistence a to tekutý, kašovitý nebo tuhý. Celý proces vstříknutí vosku závisí na správném nastavení parametrů jako teplota vosku a formy, tlak vstříkovaného vosku a jeho rychlost nebo doba vstříkování.



Obr. 5 Schéma vstřikovacího lisu [6]

Odstříknutý vosk je po zchladnutí na požadovanou manipulační teplotu vyjmut z formy. Takto vytvořený model se pak nechává 24 hodin vyžrát a stabilizovat. Poté je pomocí speciálních vosků přilepen na vtokový kůl do stromečku. Množství a skladba modelů připojených na vtokový kůl je závislá na tvarové složitosti a velikosti vyráběné série. Na takto sestaveném stromečku je dále vytvořena keramická skořepina.

### 1.2.2 Výroba keramické formy [1],[5],[10]

Výroba keramické formy dala této technologii název (to invest = nanášet) a je jednou z nejdůležitějších operací procesu. Jedná se o nedělenou, netrvalou formu, která je po každém odlití rozbita.

Před samotným obalováním je potřeba model očistit od nečistot a od separačních prostředků, aby došlo k dobrému přilnutí základní vrstvy. Opakovanou kombinací 3 úkonů namáčení v keramické břečce, posypávání ostřivem a sušení vzniká obal, který je dále zpracováván. Obalování se provádí v 5 - 15ti vrstvách v závislosti na požadované tloušťce formy. Tento proces je z celé výroby nejdéletrvající a trvá několik dní.

- **Namáčení v keramické břečce**

Keramická břečka obsahuje dvě základní složky pojivo a plnivo. Jako pojivo se používají křemičité soly na bázi alkoholu nebo vody. Plnivem je většinou žáruvzdorná křemičitá moučka. Tyto dvě složky jsou zamíchány na požadovanou tekutou konzistenci. Sestavené stromečky se do břečky rovnoměrně namácejí a nechávají se odkapat od přebytečné tekutiny. Ukázka namáčení je na obr. 6.



Obr. 6 Namáčení v břečce [10]

- **Posyp ostřivem**

Na vrstvu břechky se poté nanáší posyp ostřiva. Používají se písky na bázi křemíku, hliníku, zirkonu nebo molochitu (je vhodný především pro vakuové metody odlévání). Nanášení ostřiva se může provádět několika způsoby a to buď sypáním písku sprchovým zařízením (*obr. 7*), vířením pomocí stlačeného vzduchu nebo ručním posypem.



*Obr. 7 Posyp ostřivem [10]*

- **Sušení**

Provádí se po nanesení každé vrstvy obalu, proto aby další vrstva dobře přilnula a původní neodpadala. Využívá se především proudícího vzduchu s upravenou teplotou a vlhkostí.

### **Vytavení modelu**

Po vytvoření dostatečně silného obalu je potřeba odstranit voskový model z formy. V této fázi lze nalézt některé vady formy, jako jsou praskliny a separace jednotlivých vrstev. Ty by mohly při vytavení nebo následném odlití kovu způsobit vady a nepřesnosti odlitku. Při vytavování vosku z formy je největším problémem vyšší tepelná roztažnost vosku než keramické formy. Je tedy potřeba vosk vytavit v co nejnižším čase s co největší intenzitou. Je především potřeba aby na rozhraní vosk-forma došlo k vytvoření dilatační spáry způsobené rychlejší tavení vosku na povrchu modelu, než uvnitř. Vytavení se provádí několika způsoby:

- plamenem – Při teplotě přes 750°C dojde k velmi rychlému odpaření vosku
- vodní parou – (v autoklávu) pomocí přehřáté páry za zvýšeného tlaku
- dielektrickým ohřevem
- teplým vzduchem
- vroucí vodou

### **Vyžhání formy**

Jakmile je forma zbavena vosku je potřeba ji tepelně zpracovat. Teplota bývá okolo 900-1000°C (pro SiO<sub>2</sub>) nebo až 1200-1400°C (pro korund nebo molochit). Vyšších teplot se využívá především u odlévání odlitků z niklových superslitin. Žháním se forma zbaví přebytečného vosku, který mohl zůstat uvnitř kvůli nedokonalému vytavení. Dále se vytvoří krystalická struktura (slinováním) a forma se předehřeje pro lití.

### 1.2.3 Odlití kovu [1],[6]

Pro vytavitelný model jsou nejčastěji používané dva základní způsoby odlévání a to lití na vzduchu nebo lití ve vakuu. Dále pak lze rozdělit na lití gravitační, sklopné, tlakové nebo odstředivé. Forma se většinou přehřívá na teplotu 700-800°C (nutnost pro křemenné formy) nebo se používá studená.

Při chladnutí a tuhnutí dochází stejně jako u většiny jiných metod ke smršťování odlitku a při konstrukci formy je třeba s ním počítat a vytvořit dostatečný nálietek a správně dimenzovat vtokovou soustavu.

### 1.2.4 Vyjmutí z formy a dokončení [1],[6],[10]

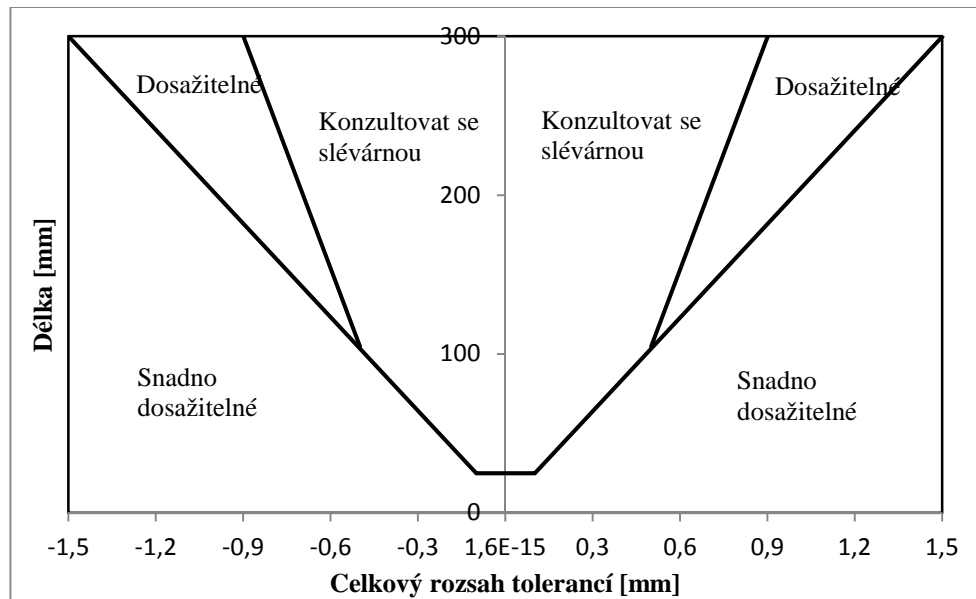
V poslední etapě výroby odlitku je potřeba odstranit keramickou formu. To se provádí pomocí vytloukacího kladiva, které během několika minut zbaví odlitek hrubých kusů formy. Dále pak lze formu odstranit tryskáním kovovými broky, tryskáním směsí vody a abrazivního materiálu nebo na různých typech vibračních zařízení.

Z takto očištěného stromečku jsou poté pomocí pásové pily odřezány odlité součásti a zbylé vtoky a nálitky mohou být opětovně roztaveny a využity. Hotové odlitky se dále povrchově upravují běžnými metodami povrchových úprav, jako je broušení a úprava proti korozi.

## 1.3 Rozměrová přesnost [1],[6]

Vysoká přesnost metody vytavitelného modelu je velkou výhodou, zvyšuje totiž výslednou hodnotu odlitku. Rozmezí rozměrových tolerancí může být, co se týče menších součástí, velmi úzké. To však není jednoduché dosáhnout. V téměř každé fázi výroby odlitku může docházet ke vzniku nepřesností způsobených rozměrovými změnami. Některé z nich lze ovlivnit již při výrobě (zhotovení voskového modelu a keramické formy), některé téměř nelze (odlití kovu a chladnutí).

Rozměrová tolerance je tedy velmi úzce spjata s celkovým rozměrem součásti. Od toho je odvozeno přibližné rozmezí ve, kterém je možné odlitek v dané toleranci zhotovit (*obr. 8*).

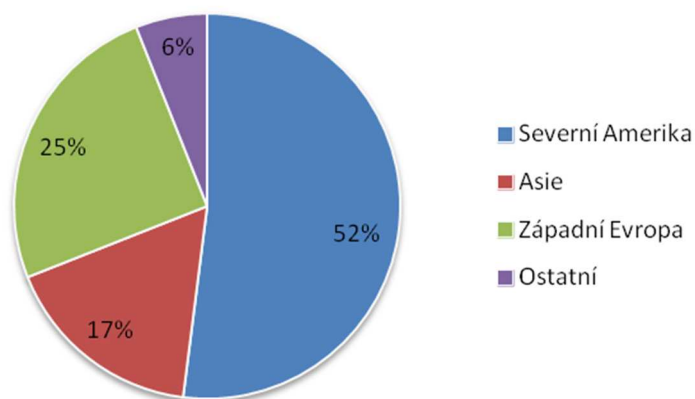


Obr. 8 Graf dosažitelných tolerancí v závislosti na rozměru [6]

#### 1.4 Světová výroba odlitků [4],[6],[11]

Produkce odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu každoročně roste. To je způsobeno celosvětovým nárůstem průmyslové výroby a novými požadavky na přesnost součástí a jejich hmotnost.

Co se týče produkce lze trh dělit na několik světových hlavních oblastí. Největším trhem s polovinou celkové produkce je Severní Amerika, následují západní Evropa, Asie a další. Procentuální rozdělení lze vidět na obr. 9.



Obr. 9 Přehled výroby odlitků vytavitelným modelem ve světě [6]

Z hlediska průmyslových odvětví, patří mezi největší odběratele odlitků vytavitelného modelu letecký průmysl, všeobecné strojírenství a energetika. Dále také automobilový nebo sportovní a volnočasový průmysl zabírají velké množství produktů.



## 2 SLITINY ŽELEZA [15],[16]

Železné slitiny (oceli, litiny) patří mezi světově nejdůležitější a nejpoužívanější konstrukční materiály vůbec. Roční produkce činí stovky milionů tun a neustále se zvyšuje. Tento nárůst výroby také vede k neustálé potřebě rozvoje nových železných slitin, které musí konkurovat moderním kompozitním materiálům a slitinám lehkých kovů. Velkou výhodou železných slitin je nízká energetická náročnost při výrobě oproti jiným kovovým materiálům, jako je například hliník.

### 2.1 Metalurgie železných slitin [15],[16],[17],[18]

#### *Železo*

Železo se jako čistý prvek v přírodě téměř nevyskytuje. Získává se z minerálních rud jako je magnetit, hematit, limonit nebo siderit. Pomocí redukčních procesů na vysoké peci se získává produkt, surové železo, které dále slouží jako vsázka pro slévárny a ocelárny.

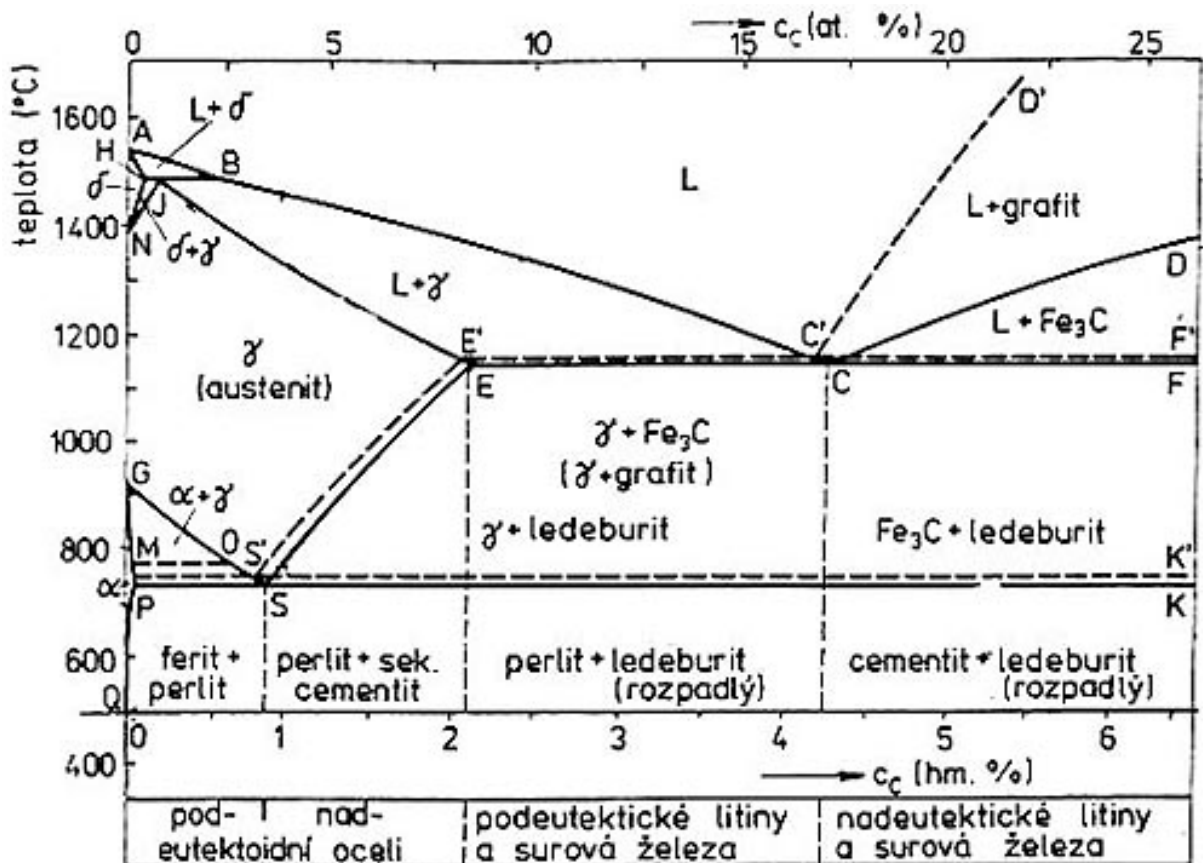
V závislosti na teplotě se může vyskytovat ve dvou základních mřížkových modifikacích. Při teplotách do 768°C má železo kubickou prostorově středěnou mřížku (BCC) a nazývá se železo  $\alpha$  ( $\alpha$ -Fe). Nad touto teplotou pak ztrácí feromagnetické vlastnosti a v intervalu 768°- 912°C má železo modifikaci  $\beta$ . Při teplotách od 912° do 1392°C dochází k přeměně mřížky na kubickou plošně středěnou (FCC) mřížku a v této modifikaci se nazývá  $\gamma$ -Fe. Po překročení teploty 1392°C se opět vrací k BCC mřížce, kde se tato modifikace se nazývá  $\delta$ -Fe. Ta pak přetrvává až do teploty tavení při 1539°C.

#### *Železo a uhlík*

Nejčastější výskyt železa je v soustavě s uhlíkem a dalšími prvky. Uhlík je v těchto slitinách jeden z nejvýznamnějších prvků. Jeho obsah má podstatný vliv na materiálové vlastnosti těchto slitin jako jsou mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, nárazová práce, houževnatost, ale také otěruvzdornost a svařitelnost.

Železo s uhlíkem vytváří intersticiální tuhé roztoky, kde rozpustnost uhlíku je omezená. Podle množství a modifikace uhlíku v železných slitinách se dělí na oceli, které tuhnou podle metastabilní soustavy (Fe-Fe<sub>3</sub>C) a litiny, které, až na výjimky, chladnou podle stabilní soustavy (Fe-C). Diagram soustavy železo-uhlík je na *obr. 10*. V průběhu chladnutí se v soustavě uhlík a železo vyskytují v několika fázích:

- austenit - intersticiální tuhý roztok uhlíku v  $\gamma$ -Fe
- ferit - intersticiální tuhý roztok uhlíku v  $\alpha$ -Fe
- ledeburit -eutektikum (složeno z austenitu a cementitu) v metastabilní soustavě
- perlit -eutektoid (složeno z feritu a cementitu) v metastabilní soustavě
- $\delta$ -ferit - intersticiální tuhý roztok uhlíku v  $\delta$ -Fe
- cementit -intersticiální sloučenina Fe<sub>3</sub>C
- grafit -uhlík uspořádaný v hexagonální mřížce
- grafitické eutektikum -eutektikum (složeno z grafitu a austenitu) ve stabilní soustavě



Obr. 10 Soustava železo-uhlík [15]

Železné slitiny se kromě železa a uhlíku skládají z celé řady dalších prvků, které se do slitin dostávají z okolní atmosféry, ze spalovaného paliva, vyzdívky, vsázky nebo se přidávají úmyslně za účelem úpravy vlastností slitiny. Tyto prvky se dělí na dvě skupiny a to na doprovodné a legující. Obě skupiny podobně jako uhlík ovlivňují celou řadu vlastností slitin.

Prvky jako mangan, křemík, fosfor, síra, kyslík, dusík a vodík jsou označovány jako doprovodné prvky, které se do taveniny dostávají většinou neúmyslně. Jejich maximální množství je určeno dohodnutým rozmezím jejich obsahu ve slitinách. Při překročení tohoto množství se doprovodné prvky považují za legury. Společně mohou tyto prvky působit prospěšně nebo naopak jako nežádoucí nečistoty. Jejich množství určuje vliv na vlastnosti.

Legury jsou do slitin přidávány úmyslně za účelem zlepšení některých vlastností. Legováním se mohou zvyšovat pevnost a tvrdost při zachování požadované houževnatosti nejčastěji přidáním Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V nebo W. Pomocí Cr, Mn, Mo, V, Ni a B lze zvyšovat prokalitelnost pro tepelné zpracování slitin. Pro zjemnění struktury a snížení sklonu k růstu zrna za vysokých teplot se leguje Ti, Nb, Ta, V. Dále lze pro zvýšení korozní odolnosti legovat Cr a Ni. Pro slitiny zatěžované vysokými teplotami se zvyšuje žárovevnu pomocí Cr, Mo, V a W. Zvýšení otěruvzdornosti a odolnosti vůči opotřebení se provádí přidáním karbidotvorných prvků jako Cr, Mo, W, V nebo Mn.

## **Oceli**

Jsou slitinami železa, uhlíku a dalších prvků, kde železo s uhlíkem vytváří intersticiální tuhý roztok  $Fe_3C$ . Množství uhlíku dosahuje max. okolo 2,1 %, většinou však bývá obsah nižší. Pro zlepšení vlastností se do ocelí přidávají legující přísady. Podle obsahu legur lze rozdělit na oceli:

- nelegované - jejich složení nebývá přesně dáno, předepsané však bývá množství síry a fosforu
- nízkolegované – má zde velký vliv obsah uhlíku, většinou jsou legovány chromem, molybdenem a niklem
- vysokolegované – pomocí většího množství legur jsou upravené některé vlastnosti ocelí, jako žárovečnost, korozivzdornost nebo otěruvzdornost

Dle druhu výroby pak lze oceli rozdělit na oceli na odlitky a oceli ke tváření. Oceli ke tváření tvoří největší skupinu ocelí a jsou určeny pro druhotné zpracování tvářecím způsobem. Oceli na odlitky jsou pro výrobu tvarově složitějších konstrukčních součástí. Obsah uhlíku a jiných prvků v těchto slitinách bývá pro různé aplikace odlišný.

Výroba oceli se provádí několika způsoby. Záleží především na objemech výroby a možnostech slévárny. Metalurgické pochody, které se provádějí při výrobě oceli, jsou určeny pro snížení nebo zvýšení koncentrace prvků ve slitině. Některé hodnoty obsahů pro určité slitiny jsou většinou přesně dané. Mezi nejpoužívanější zařízení pro výrobu pak patří elektrická oblouková pec (EOP), indukční pec (EIP) nebo kyslíkový konvertor.

*EOP* je agregát, který pro tavení a ohřev taveniny využívá vysokou teplotu při hoření elektrického oblouku (3000–4000°C). Jako vsázkový materiál pro pec se používá ocelový šrot, vratný materiál slévárny a surové železo. Takto nadruhovaná vsázka se vsype do pece a pomocí grafitových elektrod se začne natavovat. Pro rychlejší protavení se do pece dmýchá kyslík. Přidáním vápna, železné rudy a nauhličovadla se na povrchu taveniny vytváří struska, která napomáhá oxidaci některých prvků a snížení jejich množství. Na rozhraní strusky a kovu dochází především k odfosfoření. Ke snížení koncentrace uhlíku a vodíku se používá uhlíkový var, při kterém zoxidovaný uhlík stoupá taveninou a do jeho bublin difunduje vodík. Po dostatečné úpravě obsahu některých prvků nastupuje údobí dezoxidace, při kterém se přidáním ferosilicia ( $FeSi$ ) a hliníku, titanu nebo vápníku odstraňuje kyslík z taveniny. Dalším procesem je odsíření, které probíhá mezi struskou a kovem. Prvky jako hliník nebo křemík proces umocňují. Takto natavený kov se ještě doleguje prvky s vyšší afinitou ke kyslíku jako je titan nebo zirkon. Prvky s nižší afinitou ke kyslíku se přidávají už do vsázky. Celý proces tavby na EOP lze zefektivnit přidáním zařízení sekundární metalurgie, na kterém mohou probíhat některé pochody jako je dezoxidace, odsíření a dolegování.

*EIP* využívá ohřevu vsázky magnetickým polem, které vzniká při průchodu střídavého proudu cívkou. Vznikají vířivé proudy, které dobře promíchávají taveninu a zajišťují její homogenitu. Výdusky pece mohou být kyselé, zásadité nebo neutrální. Velkou výhodou těchto agregátů je možnost menších taveb v krátkém časovém intervalu. Jako vsázka se

používá vratný materiál a ocelový odpad s nízkým procentem uhlíku. Z důvodu propalu některých prvků, jako je mangan nebo vanad, během tavby je třeba je dosazovat. Některé prvky jako například chrom mají propal zanedbatelný. Při tavení se vsázka dosazuje kontinuálně. Po dosažení dostatečného množství roztaveného kovu se stáhne původní struska a pomocí drceného skla se vytvoří nová. Podle potřeby se doleguje a ohřeje na teplotu odpichu.

Z hlediska vytavitelného modelu se ve slévárnách, které odlévají ocel používají některé slitiny s předem daným chemickým složením, které se do sléváren dodávají ve formě předslitin. Příklady některých takovýchto slitin a jejich chemického složení jsou v tab. 2.1. Toho se využívá především proto, že objemy kovu nebývají tak velké, aby slévárna využila velkých tavících agregátů, jako je EOP.

Tab. 2.1 Příklady ocelí používaných pro lití na vytavitelný model [19],[20]

Název slitiny	Obsah v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P max.	S max.	Další prvky
<i>Nízkolegované oceli</i>									
1020	0.15-0.25	0.20-0.60	0.20-0.60	max. 0.25	max. 0.25	max. 0.25	0.04	0.045	max. 0.25 Cu
4150	0.45-0.55	0.75-1.00	0.20-0.80	0.80-1.10	max. 0.25	0.15-0.25	0.04	0.04	...
6150	0.45-0.55	0.65-0.95	0.20-0.80	0.80-1.10	...	...	0.04	0.04	min. 0.15 V
<i>Korozivzdorné oceli</i>									
410	0.05-0.15	1.00	max. 1.5	11.5-14.0	max. 1.0	max. 0.5	0.04	0.04	max. 0.50 Cu
303	max. 0.16	max. 1.5	max. 2.0	18.0-21.0	9.0-12.0	0.40-0.80	0.04	0.02-0.04	...
442	max. 0.30	max. 1.0	max. 1.5	18.0-22.0	max. 2.0	...	0.04	0.04	...
<i>Nástrojové oceli</i>									
A-2	0.95-1.05	0.75	1.5	4.75-5.50	...	0.9-1.4	0.03	0.03	0.2-0.5 V
D-5	1.35-1.6	0.75	1.5	11.0-13.0	...	0.7-1.0	0.03	0.03	0.35-0.55 V
S-7	0.45-0.55	0.5-0.8	0.6-1.0	3.0-3.5	...	1.2-1.6	0.03	0.03	...

Po odlití, vychladnutí a vyjmutí odlitku z formy, jsou jeho mechanické vlastnosti a struktura nevyhovující, proto je potřeba je pomocí tepelného zpracování upravit. Odlitky lze upravovat několika způsoby. Veškeré tepelné zpracování záleží zpravidla na teplotě a rychlosti a způsobu ohřevu a ochlazení. Zpracování se provádí žíháním, které odstraňuje nežádoucí vlastnosti předešlého zpracování. Dále pak kalením, pro vytvoření tvrdé struktury a popouštění.

### Litiny

Jde o slitiny železa, uhlíku a jiných prvků. Uhlík se v litinách vylučuje jako grafit nebo jako karbid železa, či jiného prvku. Jeho procentuální obsah bývá vyšší než 2 %. Dalšími prvky výrazněji obsaženými v litinách bývají křemík a mangan.

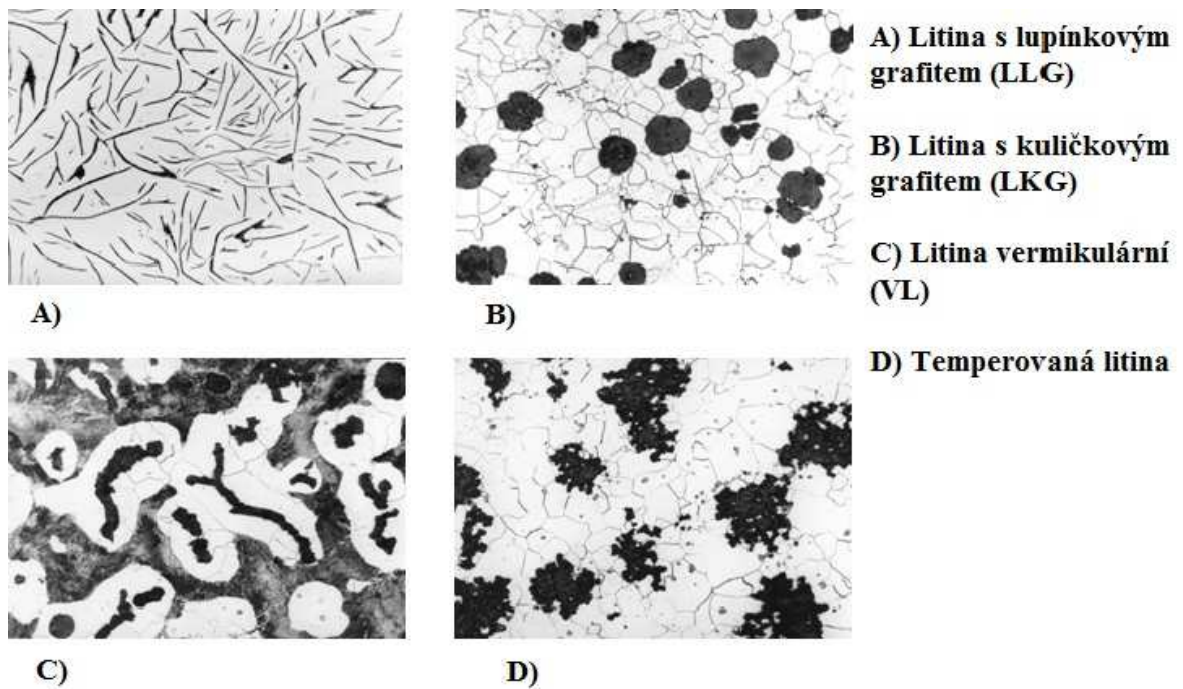
Litiny mohou tuhnout dvěma způsoby. Buď podle metastabilního digramu (Fe-Fe<sub>3</sub>C), kde eutektikum je ledeburit nebo podle stabilního diagramu kde vzniká grafické eutektikum.

V prvním případě vznikají litiny bílé (karbidické), které mají z mechanického hlediska vysokou tvrdost a křehkost. Jejich využití je u aplikací vyžadujících vysokou otěruvzdornost. Takovouto litinu lze pomocí tepelného zpracování přeměnit v temperovanou litinu, která se díky vyloučenému grafitu řadí mezi grafické. Zde se při žíhacích teplotách rozpadá cementit

a nově vzniká vločkový grafit. Temperované litiny jsou houževnaté a ve srovnání s šedou litinou mají vyšší pevnost.

V druhém případě vznikají grafitické litiny, u kterých se uhlík vylučuje ve formě austenitu a grafitu, kde tvar grafitu určuje druh litiny (příklady jsou na *obr. 11*). Podle tvaru grafitu se dělí na:

- *litina s kuličkovým grafitem (LKG)* – (dříve nazývaná jako tvárná litina) Grafit je ve formě kuliček. Tento tvar vyloučení grafitu je vhodný z hlediska mechanických vlastností. Při dobrých hodnotách pevnosti jsou vysoké hodnoty tažnosti a dobrá obrobitelnost. Pro vytvoření kuliček grafitu, je potřeba taveninu modifikovat hořčíkem, který se ve formě předslitin dávkuje na dno pánve a postupně jí probublává na povrch. Důležitá je také doba chladnutí, kde čím je kratší, tím se vytváří menší útvary grafitu a hrozí menší sklon k odmíšení.
- *litina s lupínkovým grafitem (LLG)* – Grafit má tvar lamel (lupínků) podlouhlého tvaru s ostrým koncem. Tyto útvary ve slitině vytváří oblasti vrubového napětí. Výroba je však jednodušší než u LKG, protože lupínky vznikají samovolně, a je proto levnější. Pevnostní charakteristiky jsou horší a tažnost bývá nízká (okolo 1%). Většinou se jedná o podeutektické slitiny (obsah C okolo 2,8-3,6%). Důležitý je obsah křemíku ve slitině, který pomáhá tvorbě grafitu. Patří mezi nejčastěji odlévané litiny.
- *vermikulární litina (LVG)* – Grafit se vytváří ve formě červíků, které jsou podobné LLG, ale jsou kratší, mají větší průměr a zakulacené konce.
- *temperovaná litina (TL)* – Grafit tvoří vločky. Vznikají tepelným zpracováním bílé litiny, kde se při žíhacích teplotách rozpadá cementit a nově vzniká vločkový grafit. Jsou houževnaté a ve srovnání s šedou litinou mají vyšší pevnost. Dělí se na TL s černým lomem, nebo bílým lomem, kde rozdíl ve výrobě je v teplotách a průběhu tepleného zpracování.
- *ADI litina* – Základem bývá LKG, u které se pomocí rychlého ochlazení na povrchu vytváří vrstva bílé litiny. Toho se dosahuje chlazením formy při odlévání buď pomocí chladítek nebo lití do kokil. Takto vytvořená vrstva má vysokou tvrdost ale jádro odlitku je houževnaté. Použití těchto odlitků je například na válce pro válcování, průvlaky, ozubené kola, apod.



Obr. 11 Tvar grafitu v litinách [18]

Pro tavení litin se v praxi nejčastěji používají dva typy pecí:

- Kuplovna – Vysoké zařízení šachtového tvaru, které se skládá ze tří základních částí. Komínu, kde se zaváží vsázka a slouží pro odvod spalin. Šachty, ve které probíhá za dmýchání vzduchu (pomocí dmyšen) hoření koksu a tavení kovové vsázky. A nístěje, ve které roztavený kov odtéká do žlábků a ven z kuplovny. Vsázku kuplovny tvoří kovový materiál, koks, struskotvorné přísady a legující prvky.
- Elektrická indukční pec – Funguje na podobném principu jako EIP pro ocel. Rozdíl může být v konstrukci pece. Pro samotné tavení se tyto pece nepoužívají, slouží spíše jako udržovací.

Podobně jako ocelové odlitky, je potřeba i litinové odlitky tepelně zpracovat. Opět je zde potřeba upravit materiálové vlastnosti. Zásadní je snížit vnitřní pnutí, zlepšit obrobiteľnosť nebo otěruvzdornost a zvýšit mechanické vlastnosti.

Odlévání litin metodou vytavitelného modelu nebývá časté, je spíše výjimkou. Pokud se však používá, jde nejčastěji o lití LKG. Litiny se v drtivé většině případů lijí do pískových forem, případně do skořepinových forem vyrobených například metodou Croning.

## 2.2 Aplikace slitin železa odlévaných metodou vytavitelného modelu

Odlitky z ocelí a litin nachází obrovské uplatnění v téměř všech průmyslových odvětvích. Co do objemů výroby zabírají odlitky, především ocelové, třetinu trhu vytavitelného modelu.

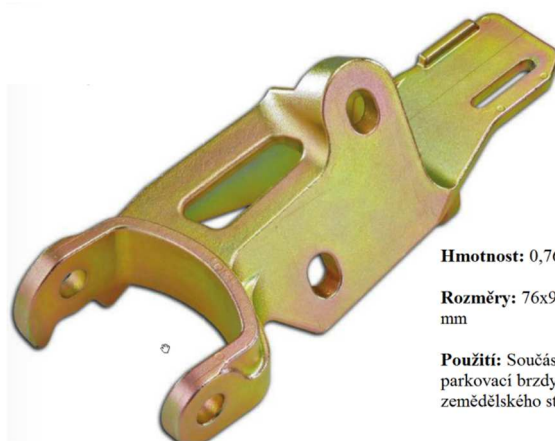
Díky vysokým přesnostem a nižším cenám výroby se ocelové a litinové odlitky lité metodou vytavitelného modelu staly na trhu velmi žádané. Výhodou jsou tvarové možnosti metody, jako odlévání tenkých stěn a žeber nebo tvorba složitých kanálků vnitřního chlazení.

### 2.2.1 Automobilový a dopravní průmysl[21],[22],[23]

Automobilový průmysl je pro vytavitelný model velkým zákazníkem, jelikož výroba aut v posledních letech roste. Díky nízkým potřebám dodatečně díly obrábět se urychluje doba jejich výroba, která je v tomto odvětví klíčová. Rostou také konstrukční možnosti. Množství odlitků pro automobilový průmysl je velké, vzhledem k tomu že odlitky zaujímají až 70 % hmotnosti automobilu. Odlitky vytavitelného modelu pak nachází uplatnění především v oblasti menších součástí, jako jsou pohybové mechanismy. Další aplikace bývají pro součásti palivových a plynových rozvodů, apod. Ukázky některých odlitků jsou na *obr. 12-15*.



*Obr. 12 Ukázka odlitků pro automobilový průmysl fy Tamboli Castings Limited [21]*



**Hmotnost:** 0,76 kg

**Rozměry:** 76x95x203 mm

**Použití:** Součást parkovací brzdy zemědělského stroje

*Obr. 13 Odlitek s povrchovou úpravou (fa Signicast)[22]*



*Obr. 14 Odlitek součásti manuální převodovky (fa CIREX) [23]*



*Obr. 15 Ventil pro systém recirkulace spalin – litina GJS (fa CIREX)[23]*



### 2.2.2 Letecký průmysl[24],[25]

Pro toto odvětví je zásadní použití součástí z materiálů schopných vydržet vysoké namáhání, a to především při zachování co nejnižší hmotnosti. Dále si však musí udržet vlastnosti jako žáruvzdornost nebo odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí. Snižování hmotnosti je zásadní z hlediska snižování nákladů na provoz letadel a jiných zařízení. Použití pak bývá zejména pro mechanicky namáhané konstrukční součásti letadel nebo rozvody paliva a plynů.



Obr. 16 Součásti palivového systému pro letouny Airbus- korozivzdorná ocel [24]



Obr. 17 Odlitky pro helikoptéru Eurocopter - korozivzdorná ocel [24]



Obr. 18 Odlitek systému pomocného pohonu - ocel (fa Miller Castings)[25]

### 2.2.3 Všeobecné strojírenství[26],[27]

U všeobecného strojírenství jsou přesné odlitky využívány v nepřeborném množství aplikací, jako jsou odlitky nástrojů, odlitky hřídelů, ozubených kol, součástí armatur nebo spojovací materiál. Další užití je i pro zařízení zpracovávající potraviny, či textil.



**Hmotnost:**  
2,2 kg  
**Rozměry:**  
226x120x120 mm

Obr. 19 Odlitek hřídele se šnekovým ozubením - fa Signicast [26]



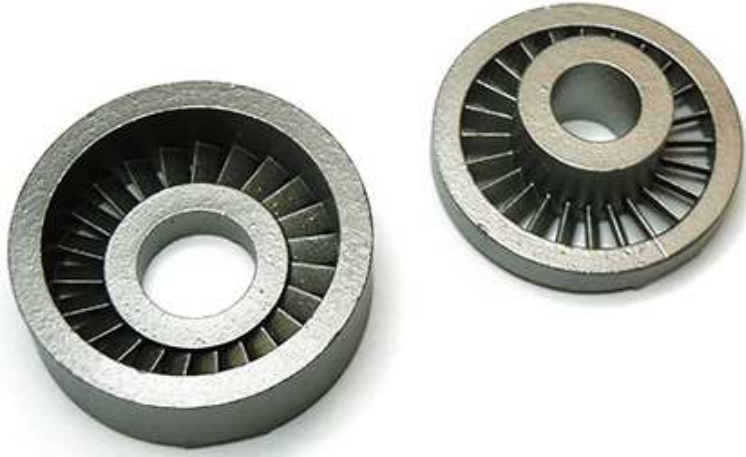
Obr. 20 Odlitky nářadí - fa Kdynium [27]



Obr. 21 Odlitky fréz - fa Kdynium [27]

#### 2.2.4 Energetika a těžební průmysl[24],[25]

Použití je pro odlitky turbín, armatur, součástí pro rozvod plynů, kapalin a chemikálií.



*Obr. 22 Odlitek rotoru a statoru pro těžební čerpadlo - fa Cirex [24]*



*Obr. 23 Odlitek pro ložisko plynové turbíny (fa Miller Castings)[25]*

### 2.2.5 Zbrojní průmysl[27]

Zbraně a zbraňové systémy jsou konstruovány tak aby vydržely náročné podmínky a zacházení. Přitom však musí být zachována vysoká přesnost. Vytavitelným modelem se vyrábí velké množství funkční částí ručních střelných zbraní (*obr. 24*) ale i zbraní těžkých, jako jsou součásti raket a raketových systémů. Samotná technologie však ne vždy dokáže vyrobit odlitek s tak vysokou přesností a často se musí obrábět. Dobře se však dokáže výsledku přiblížit.



*Obr. 24 Odlitky pro zbrojní průmysl - fa Kdynium [27]*

### 2.2.6 Sportovní a volnočasové použití[28]

V tomto odvětví najdou odlitky uplatnění v oblastech vyžadujících náročnější sportovní vybavení. Například použití pro profesionální potápěčské přilby (*obr. 25*), násady golfových holí, úchyty lan pro jachting a další.



*Obr. 25 Odlitek těla potápěčské přilby - korozivzdorná ocel (fa Aristo Cast)[28]*

### 3 SUPERSLITINY [29],[30]

S vývojem leteckého průmyslu bylo potřeba vyvíjet nové materiály, které budou schopné odolat korozi a degradaci při vysokých teplotách. Okolo 50. let minulého století začaly nové proudové motory postupně nahrazovat motory pístové. Vývoj nových proudových motorů byl úzce spjat s vývojem nových superslitin. Rozvoj těchto materiálů měl značný význam pro součásti vysoce zatěžované teplotami blízcími se teplotám jejich tavení. Jejich rozvoj je dnes velmi důležitý nejen v leteckém, ale také v energetickém průmyslu, kde je klíčový vývoj nových vysoce efektivních turbín. Z důvodů rychlosti celosvětového růstu populace se předpokládá více než dvojnásobný nárůst spotřeby energie, čímž pravděpodobně vysoce vzroste poptávka po těchto materiálech.

Jedny z prvních superslitin se začaly vyrábět na počátku druhé světové války. Šlo především o slitiny na bázi železa, které byly zpracovávány tvářením za studena. Později se díky možnostem technologie vytavitelného modelu se začaly zpracovávat nové typy slitin na bázi kobaltu. S příchodem vakuových zařízení okolo 50. let se začala zvyšovat chemická čistota slitin a začaly se uplatňovat metody pro řízenou krystalizaci a tvorbu monokrystalů. Zamezilo se také reaktivitě titanu a hliníku se vzdušným kyslíkem použitím vakuových zařízení.

#### 3.1 Metalurgie superslitin[29],[30],[31]

Superslitiny jsou založeny na kubické plošně centrované mřížce (FCC). Tato struktura je odolná vůči značnému legování pro vytvrzování a odolná proti oxidaci.

Základem superslitin je v podstatě kombinace prvků jako nikl, kobalt, chrom nebo železo, které jsou v objemu obsaženy ve větší míře. Dále obsahují prvky jako wolfram, molybden, tantal, niob, titan nebo hliník.

Množství a skladba příměsových prvků a legur ve slitinách, má vliv na vlastnosti slitiny, jako hustotu nebo korozní odolnost. Obsah základního prvku pak určuje druh superslitiny. Nejčastěji jsou to slitiny na bázi Ni, Co, Ni-Fe nebo Ni-Cr.

Pevnost superslitin je dána několika mechanismy zpevnění. Ty jsou způsobeny vyloučením zpevňujících fází. Jako například zpevnění tuhým roztokem  $\gamma$ , což je austenitická fáze, a také vyloučenou fází  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ), která způsobuje precipitační zpevnění. Další mechanismy vytvrzení mohou být vyloučení karbidů na hranici zrn.

##### 3.1.1 Niklové superslitiny[15],[29],[30],[31],[32],[33],[34]

Nejdůležitější skupinu superslitin tvoří slitiny na bázi niklu, kde nikl je základní prvek. Jeho obsah ve slitině bývá v rozmezí 40-80%. Nikl jako chemický prvek má velmi dobré antikorozi vlastnosti. Z hlediska tažnosti má podobné vlastnosti jako ocel. V aplikacích často

odlitky z niklu nahrazují ocelové materiály v oblastech, kde je ocel nedostačující, především pro vysokoteplotní aplikace. Samotné superslitiny si slévárny samy nevyrobí. Jsou dodávány několika světovými dodavateli ve formě tyčového polotovaru, který slévárna roztaví na svém tavicím agregátu. Nikl je často ve slitinách s jinými prvky. Nejčastěji jsou to prvky jako Cr, Fe, Mo, nebo Cu. Dalšími legury ve slitinách pak mohou být Co, Fe, W, V, Nb, Ta, B, Zr, Mg, Ti, Mo.

Korozní odolnost některých niklových superslitin je způsobena legováním Al a Cr. Tyto prvky jsou reaktivní s kyslíkem a při kontaktu s ním vytváří na povrchu oxidickou vrstvu  $Al_2O_3$  a  $Cr_2O_3$ . Výroba takovýchto slitin je proto náročná z technologické stránky. Tavbu, odlití (většinou vytavitelným modelem) a tepelné zpracování je potřeba provádět pod vakuem, nebo pod ochrannými plyny (Ar, N) ve speciálních zařízeních. Některé superslitiny se však mohou odlévat na vzduchu (příklady jsou v tab. 3.1).

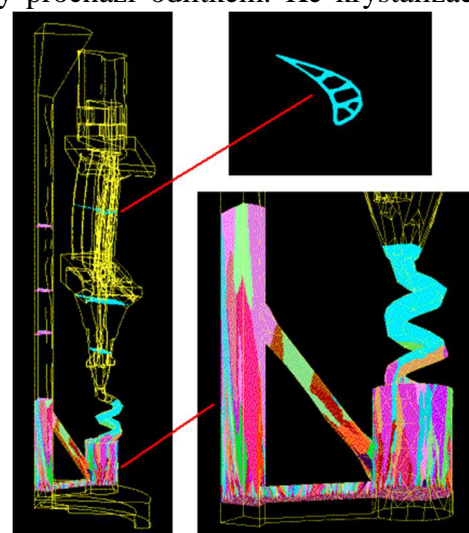
Tab. 3.1 Niklové superslitiny odlévané na vzduchu [19],[35]

Název slitiny	Obsah v %								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	Co	Fe	Další prvky
HASTELLOY®B-2	0.02	1.0	0.1	1.0	26.0-30.0	...	1.0	2.0	...
HASTELLOY®C-22	0.01	0.5	0.08	20.0-22.5	12.5-14.5	2.5-3.5	2.5	2.0-6.0	0.35 V
MONEL® 400	0.3	2.0	0.5	...	...	...	...	2.5	28.0-34.0 Cu
IN 610	0.4	1.5	3.0	14.0-17.0	...	...	...	11.0	

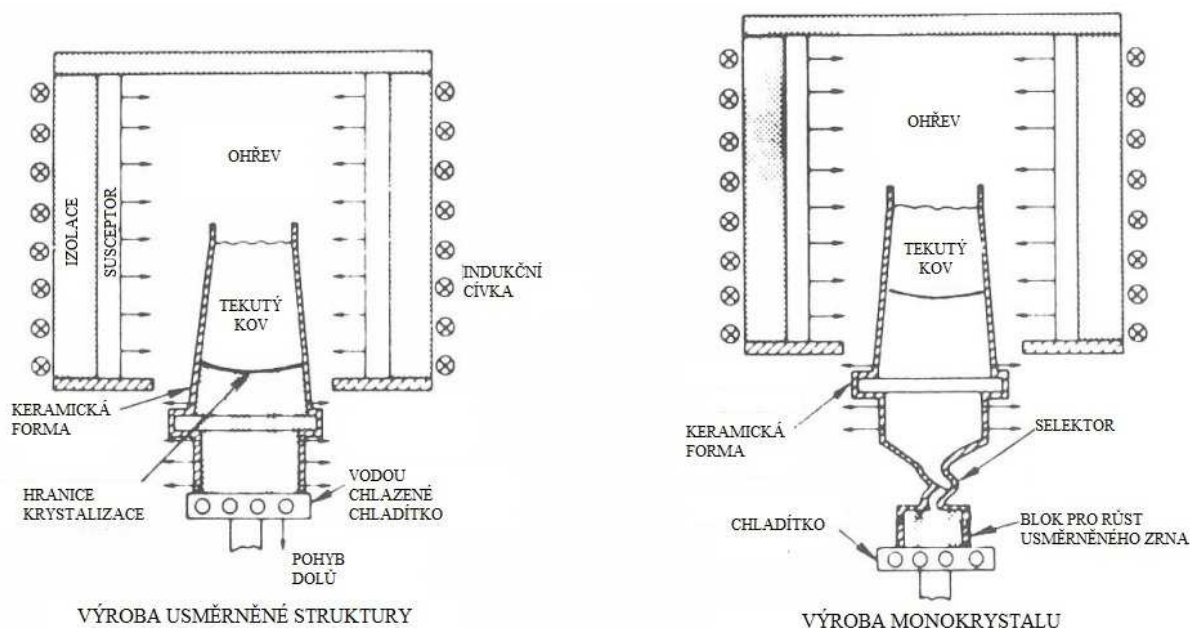
Běžná struktura po odlití niklové superslitiny je polykrystalická. Tuto strukturu lze pomocí řízené krystalizace během chladnutí upravovat (obr. 27). Tato metoda se používá pro vytvoření buďto usměrněné krystalické struktury nebo k vytváření tzv. monokrystalu. Oba tyto typy struktur mají výborné vlastnosti při zatěžování vysokými teplotami a používají se především pro výrobu lopatek turbín pro energetiku a letecké proudové motory.

Výroba *usměrněné struktury* se provádí pomocí intenzivního chlazení jednoho konce odlitku. Dochází k velkému teplotnímu gradientu, který prochází odlitkem. Ke krystalizaci pak dochází v tom směru, ve kterém je ochlazování prováděno. Celý proces chladnutí trvá několik hodin.

*Monokrystalická struktura* je velmi náročná a nákladná na výrobu z důvodů potřeby slitiny o přesném chemickém složení a vakuového zařízení. Klíčovým je vytvoření struktury skládající se pouze z jednoho zrna. Tyto slitiny musí obsahovat minimální množství prvků zpevňujících hranici zrn. Princip chlazení je podobný jako u usměrněné struktury. Pro vytvoření struktury bez hranic zrn se do procesu dále zařazuje selektor, což je spirálovitý útvar, který umožňuje růst pouze jednoho zrna. Simulace jeho funkce je na obr 26.



Obr. 26 Simulace růstu monokrystalu v selektoru[36]



Obr. 27 Schéma výroby usměrněné a monokrystalické struktury [34]

Tyto dva typy slitin obsahují reaktivní prvky, a proto musí být odlévány ve vakuu. Příklady chemického složení některých superslitin jsou v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Příklady niklových superslitin pro vakuové odlévání [19],[35]

Název slitiny	Obsah v %									
	C	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Hf	Re	Další prvky
<i>Pro monokrystalickou strukturu</i>										
PWA 1480	...	10.0	5.0	...	4.0	12.0	5.0	...	...	1.5 Ti, 0.003 B
Rene N4	...	10.0	8.0	2.0	6.0	5.0	4.2	0.2	...	3.5 Ti
Rene N6	...	4.0	12.0	1.0	6.0	7.0	5.8	0.2	5.0	...
CMSX-2	...	8.0	5.0	0.6	8.0	6.0	5.6	...	...	1.0 Ti
CSMX-10K	...	2.0	3.0	0.4	5.0	8.0	5.7	0.03	6.0	0.1 Nb, 0.2 Ti
<i>Pro usměrněnou strukturu</i>										
MAR M 002	0.15	9.0	10.0	...	10.0	2.5	5.5	1.5	...	1.5 Ti, 0.015 B, 0.05 Zr
PWA 1426	0.1	6.5	12.0	2.0	6.0	4.0	6.0	1.5	3.0	0.015 B, 0.03 Zr
Rene 142	0.12	6.8	12.0	2.0	5.0	6.0	6.2	1.5	3.0	0.015 B, 0.02 Zr
GTD 111 M	0.1	14.0	9.5	1.6	3.8	2.8	3.0	...	...	4.9 Ti, 0.012 B

Niklové slitiny lze podle teplotního zatížení rozdělit do dvou kategorií:

- **žáropevné:** Slitiny na bázi Ni-Cr s přísadovými prvky jako Ti a Al. Tyto přísady slouží k vytvrzení. Dále slitiny obsahují karbidotvorné přísady, které zpevňují matici niklu a tvoří další karbidy. Přísadové prvky po použití rozpouštěcího žhání vytváří disperzní precipitáty intermetalických sloučenin. Slitiny mají dobré mechanické vlastnosti do teploty až 950°C.
- **žáruvzdorné:** Slitiny na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. Hlavním přísadovým prvkem je tedy Cr, který zaručuje žáruvzdornost slitiny. Jeho obsah ve slitinách se pohybuje v rozmezí 15-30% slitiny, obsah Fe bývá až 20%, obsah C a jiných příměsí je minimální. Zpevnění tuhého roztoku je substituční. Použití těchto slitin je až pro teploty 1150°C, ale při horších mechanických vlastnostech, především vyšším creepu.

### 3.1.2 Kobaltové superslitiny[15],[31],[37]

Jsou primárně určeny pro součásti vysoce zatěžované teplotou a napětím (lopatky turbín, turbodmychadla). Základem je kobalt, který tvoří většinu slitiny. Další důležité prvky jsou Cr, Ni, Mo, W, Fe, C, Mn, Si. Protože se do kobaltových slitin pro vytvrzení běžně nepřidávají prvky jako Al a Ti, které jsou reaktivní se vzduchem, při jejich výrobě většinou není potřeba použití drahých vakuových zařízení pro tavbu a odlévání. Výjimku tvoří slitiny typu MAR-M, které obsahují prvky jako zirkon, tantal nebo hliník.

Slévárenské vlastnosti jsou dobré, především nižší teplota tavení (přibližně 1200-1400°C), dobrá tekutost kovu, méně vad způsobených plyny a menší propal legur. Naopak mohou být nákladnější na výrobu, mají horší obrobiteľnosť a ošeruvzdorné slitiny mohou mít sklón k trhlinám.

Na rozdíl od niklových slitin nebyl vývoj kobaltových slitin, tak velký. Dnes se jich používá jen pár desítek. Příklady některých kobaltových slitin jsou v *Tab. 3.3*.

*Tab. 3.3 Příklady kobaltových slitin [37]*

Název slitiny	Obsah v %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Fe	Další prvky
<i>Ošeruvzdorné slitiny</i>								
Stellite 1	2.0-2.7	1.0	1.0	29.0-33.0	3.0	11.0-14.0	3.0	...
Stellite 6	0.9-1.4	1.0	1.5	27.0-31.0	3.0	3.5-5.5	3.0	1.5 Mo
Stellite 12	1.1-1.7	1.0	1.0	28.0-32.0	3.0	7.0-9.5	3.0	...
Stellite 19	1.5-2.1	1.0	1.0	29.5-32.5	3.0	9.5-11.5	3.0	...
Star-J	2.2	1.0	1.0	31.0-34.0	2.5	16.0-19.0	3.0	...
Alloy 98M2	1.7-2.2	1.0	1.0	28.0-32.0	2.0-5.0	17.0-20.0	2.5	0.8 Mo, 1.1 B, 4.2 V
<i>Žárovzdorné slitiny</i>								
Stellite 21	0.20-0.30	1.0	1.0	25.0-29.0	1.75-3.75	...	3.0	5.5 Mo, 0.007 B
Stellite 25	0.05-0.15	1.0-2.0	1.0	19.0-21.0	9.0-11.0	14.0-16.0	3.0	...
Stellite 31	0.45-0.55	1.0	1.0	24.5-26.5	9.5-11.5	7.0-8.0	2.0	0.5 Mo
X-40	0.45-0.55	1.0	1.0	24.5-26.5	9.5-11.5	7.0-8.0	2.0	0.01 B
X-45	0.20-0.30	0.4-1.0	0.75-1.0	24.5-26.5	9.5-11.5	7.0-8.0	2.0	0.01 B
FSX-414	0.20-0.30	0.4-1.0	0.5-1.0	28.5-30.5	9.5-11.5	6.5-7.5	2.0	0.01 B
W1-52	0.40-0.50	0.5	0.5	20.0-22.0	1.0	10.0-12.0	2.0	20. Nb
MAR M 302	0.78-0.93	0.2	0.4	20.0-23.0	...	9.0-11.0	1.5	0.01 B, 0.2 Zr, 9.0 Ta
MAR M 509	0.55-0.65	0.1	0.4	21.0-24.0	9.0-11.0	6.5-7.5	1.5	0.2 Ti, 0.5 Zr, 3.5 Ta
<i>Biomedicínská slitina</i>								
ASTM F75	0.35	1.0	0.4	27.0-30.0	1.0	...	1.5	6.0 Mo

Superslitiny kobaltu lze rozdělit z hlediska materiálových vlastností na dvě skupiny použití, a to:

- *Žáropevné* – Tyto slitiny tvoří velkou část vyráběných kobaltových slitin. Jejich význam je v aplikacích, kde jsou součásti zatěžované vysokou teplotou a napětím. Mají vyšší obsah legur Cr, Ni a W. Jejich použití bývá v oblastech, kde dochází ke spalování ropy nebo jsou v kontaktu s mořskou vodou.
- *Ošeruvzdorné* – Podobně jako žárovevné jsou silně legované chromem a wolframem. Dále obsahují malé množství uhlíku. Uhlík a wolfram ve slitinách napomáhají tvorbě karbidů, které zvyšují tvrdost a ošeruvzdornost.



## 3.2 Aplikace superslitin odlévaných metodou vytavitelného modelu

Superslitiny nachází největší využití u aplikací, které musí pracovat při vysokých teplotách. Tyto teploty často překračují teploty tavení samotných slitin. I za takovýchto podmínek si musí materiál zachovat své vlastnosti. Superslitiny prakticky vznikly kvůli poptávce leteckého průmyslu v období před a hlavně po 2. světové válce. Metoda vytavitelného modelu je při jejich výrobě zásadní a to především pro vakuové lití.

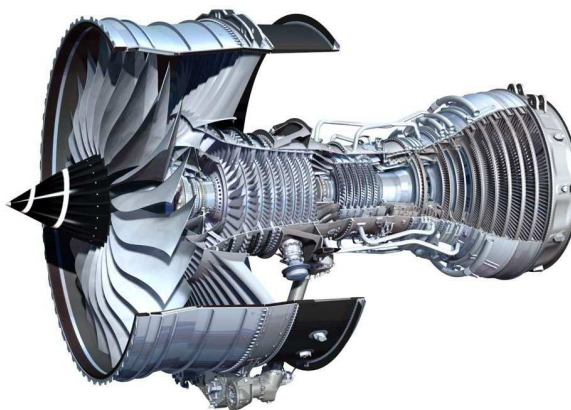
Z toho důvodu, že některé z těchto materiálů jsou jen velmi těžko obrobitelné, je potřeba vytvořit tvar odpovídající požadovanému s dostatečnou přesností, která je srovnatelná s výrobou pomocí jiné technologie, například třískové obrábění. Při výrobě lopatek, pak umožňuje metoda vytavitelného modelu výrobu složitých chladících kanálků vytvářených pomocí keramických jader.

### 3.2.1 Letecký průmysl [38],[39],[40],[41]

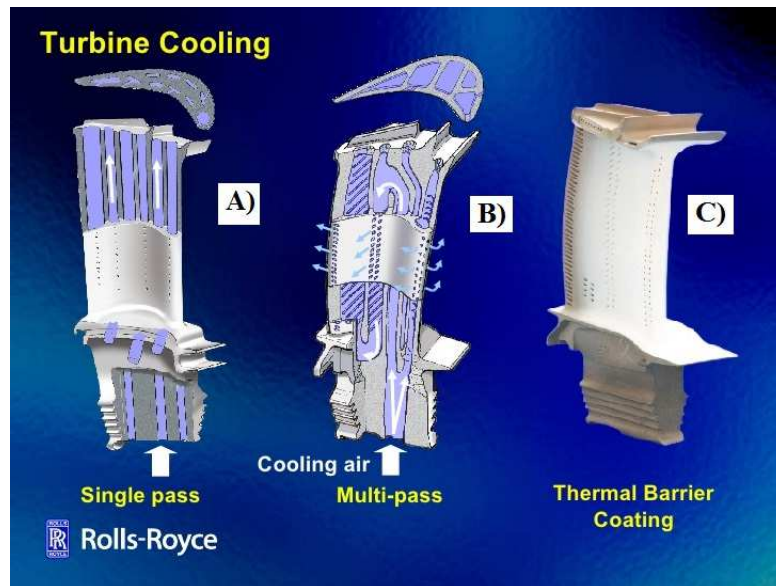
V tomto odvětví se superslitiny využívají téměř výhradně v motorech, kde jsou nezbytné v nejvíce tepelně ovlivněných částech. Jsou to tedy zejména lopatky turbín, nebo i celé lopatkové kola.

Lídrem v tomto odvětví je v poslední době firma Rolls-Royce, která vyrábí jeden z nejefektivnějších leteckých motorů na světě Trent XWB (*obr. 28*). Ve vlastní slévárně ve městě Darby v Anglii si pro své motory vyrábí superslitinové lopatky nejvyšší kvality.

Motor má v průměru téměř 300 cm a je tak jeden z největších, které se vyrábí. Dokáže nasávat okolo 1,3 tuny vzduchu za vteřinu. Ten je rozdělen do dvou komor, kde 90 % vzduchu odchází ven a pohání motor vpřed a zhruba 10 % pokračuje do spalovací komory. Tam je vzduch stlačen na 50ti násobek svého tlaku, smíchán s palivem a shoří. Vznikají zde vysoké teploty, které pohánějí soustavu turbínových kol za sebou a ty pohánějí nasávací turbínu. Samotné lopatky jsou pak vystaveny obrovským teplotám, proto musí obsahovat soustavu vnitřního chlazení a zároveň musí být povlakované vrstvou keramiky (*obr. 29*).



*Obr. 28 Průřez motorem Rolls-Royce Trent XWB[38]*



A) Průřez lopatkou s  
původním chlazením  
Single-pass  
B) Průřez lopatkou  
se složitým  
chlazením Multi-pass  
C) Povlakovaná  
lopatka

Obr. 29 Princip chlazení lopatek Rolls-Royce[39]

Pro snížení výrobních nákladů a zjednodušení konstrukce se někdy používají celá turbínová kola, případně se lopatky spojují do segmentů (obr. 30) po několika kusech. Takovéto řešení také zvyšuje výkonnost a kvalitu kol. Nevýhodou je, že v případě poškození musí být výměn celý rozměrný díl, místo jednotlivé menší komponenty.



Rotorová lopatka

slitina: IN 738LC  
hmotnost: 2 kg



Lopatkový segment

slitina: FSX 414  
hmotnost: 8,2 kg



Rotorová lopatka

slitina: Equivalent 111  
hmotnost: 15 kg



Lopatkový segment

slitina: INCO 939  
hmotnost: 104 kg

Obr. 30 Ukázka lopatek a lopatkových segmentů (fa Turbine Casting)[41]

Mimo jiné lze odlitky ze superslitin aplikovat i v jiných oblastech leteckého průmyslu, jako jsou výfukové ústrojí a jejich součásti (obr. 31, 32) nebo skříně plynových (obr. 33) a kapalinových rozvodů.



Obr. 31 Výfuky z niklové superslitiny 213 (fa United Superalloys)[42]



Obr. 32 Držák turbíny a výfukového potrubí - slitina IN-718 (fa Miller Castings)[25]



Obr. 33 Skříň pro přívod vzduchu – slitina IN-718 (fa Miller Castings)[25]

### 3.2.2 Energetika[43]

Zde, podobně jako u leteckého průmyslu nachází velké využití v oblasti výroby lopatek, lopatkových segmentů a případně celých kol plynových turbín (*obr. 34*). Další možné použití odlitků je pro součásti rozvádějících kapaliny o vysokých teplotách, pro skříně měřících zařízení a senzorů a také pro držáky palivových článků v jaderných reaktorech (*obr. 35*).



*Obr. 34 Lopatkové kolo (fa Prague Cast)[43]*



*Obr. 35 Držák palivových článků (fa Prague Cast)[43]*

### 3.2.3 Automobilový průmysl[44]

V automobilovém odvětví dochází v poslední době k naddimenzování motorů z důvodů úspory paliva. To má však vliv na opotřebení materiálu. Pro běžné osobní automobily nemají superslitinové odlitky význam, protože v motorech nevznikají tak vysoké teploty. Využití je však u vozů sportovních a vysoce výkonných a nákladních, kde vznikají vysoké teploty v oblastech, jako jsou rozvody plynů ze spalovacích komor a výfukového potrubí. Možnost použití je také pro kola turbodmychadel (*obr. 36*).



*Obr. 36 Ukázka odlitků turbodmychadel - slitina IN-713 (fa PBS Velká Bíteš)[44]*

### 3.2.4 Biomedicína[43]

Nejznámější použití superslitin v medicíně je pro kloubní náhradu kolenního kloubu (*obr. 37*), tzv. endoprotézu. V dnešní době to však mohou být náhrady i jiných kloubů, jako jsou ramenní, kyčelní, zápěstní nebo loketní klouby. O takovéto náhradě kloubu lze mluvit jako o buďto částečné, kdy dojde k výměně pouze poškozené části, nebo o úplné, kdy jsou nahrazeny veškeré kloubní části. Superslitinový materiál používaný pro tuto aplikaci bývá na bázi kobaltu a chromu.



*Obr. 37 Ukázka odlitků pro kloubní náhrady (fa United Superalloys)[42]*

## ZÁVĚR

Výroba odlitků technologií vytavitelného modelu je v dnešní době velmi rozšířená a povědomí o ní roste. Díky svým rozměrovým přesnostem, kvalitě povrchu a variabilitě velikostí sérií si na trhu získala dobré postavení. Ve spojení s mnohdy nižšími náklady, se metoda dobře uplatňuje ve většině průmyslových odvětví. Využití a výroba těchto odlitků se během minulého století rozšířila ze dvou jejich klíčových oblastí výroby, a to leteckého a zbrojního průmyslu, do mnoha dalších. Dnes je jejich produkce podstatná nejen pro energetiku a všeobecné strojírenství ale také těžební průmysl nebo sportovní a volnočasové využití, kde nachází zajímavé uplatnění.

Ocelové a litinové odlitky vyráběné touto metodou nacházejí velké využití v automobilovém průmyslu. Zde je podstatná výroba především rozměrově menších součástí v objemných sériích. Letecký průmysl je také významným odběratelem přesných odlitků, kde jejich použití je převážně pro tepelně, pevnostně nebo chemicky zatěžované součásti. Nemale množství produkce pak tvoří ocelové odlitky pro zbrojní průmysl, energetiku, těžební průmysl či sportovní vybavení.

Superslitinové odlitky zůstávají nenahraditelné z pohledu jejich materiálových vlastností. Díky žárovzdornosti a žárovečnosti těchto slitin se využívají především v leteckém průmyslu, kde je snášenlivost vysokých teplot a namáhání podstatná. Nejzásadnější je použití pro monokrystalické lopatky z niklových superslitin pro letecké motory a plynové turbíny. Další významné aplikace niklových slitin jsou pro výfukové systémy nebo podpůrné konstrukce. Superslitiny na bázi chromu pak nachází uplatnění u součástí náchylných na otěr, jako jsou například endoprotézy.

## Seznam literatury

- [1] BEELEY, Peter R. Investment Casting. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.
- [2] Process History. In: TAMBOLI CASTINGS LIMITED [online]. © 2016 Tamboli Castings Limited [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://tcl.in/products/product-history/>
- [3] History of Investment Casting. In: INVEST CAST INC MINNEAPOLIS. [online]. 2016, INVEST CAST INC. [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.investcastinc.com/history-of-investment-casting/>
- [4] HORÁČEK, Milan. Slévárnství: Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíctelí. Brno: Svaz sléváren ČR, 2001, **XLIX**(10). ISBN 0037-6825. ISSN 0037 6825
- [5] HORÁČEK, Milan a Jarmil CILEČEK. Accurate and complex NET-SHAPE castings for challenging markets. Foundry Trade Journal, U.K.,2007,volume 180, Nr.3641. ISBN 0015-9042. ISSN 0015 9042.
- [6] HORÁČEK, Milan. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu [online]. VUT v Brně, 2009, 92 s. [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [7] Investment-casting. In: Aristo Cast [online]. © 2014 Aristo Cast Corporation. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.aristo-cast.com/images/investment-casting.jpg>
- [8] Investment casting wax In: Westech wax products. [online]. ©2014, WESTECH[cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/investment-casting-wax/>
- [9] Investment Casting Wax. Categories of Investment Casting Wax [online]. [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/categories.php>
- [10] Introduction to ceramic shell investment casting. In: RAMSON & RANDOLPH. [online]. Ohio, USA [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.ransom-randolph.com/intro-to-ceramic-shell-casting.html>
- [11] HORÁČEK, Milan. Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu. Slévárnství. 2001, č. 10, s. 564-570. ISSN 00376825.
- [12] MILWAUKEE PRECISION CASTING IN [online]. © 2016 Milwaukee precision casting [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.milwaukeeprec.com/>
- [13] Turbine blade.THE ENGINEER. Jewel in the crown: Rolls-Royce's single-crystal turbine blade casting foundry [online] © 2015 The Engineer[cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/centaur-wp/theengineer/prod/content/uploads/2015/06/08073000/RR-Turbine-blade-357x500.jpg>
- [14] MARUTI STEEL CASTING [online]. ©Maruti steel Casting. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.marutisteelcasting.com/>

- [15] PTÁČEK, Luděk, a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3
- [16] ZÁDĚRA, Antonín. *Metalurgie oceli (CME)*. [přednáška] Brno: VUT FSI, březen 2015.
- [17] ŠENBERGER, J., STRÁNSKÝ, K., ZÁDĚRA, A., BŮŽEK, Z., KAFKA, V. *Metalurgie oceli na odlitky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [18] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [19] Our products. Cannon Muskegon Corp [online]. ©2016. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://cannonmuskegon.com/products/>
- [20] Alloy list. WISCONSIN PRECISION CASTING CORP.[online]. ©2011 WISCONSIN. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.wisconsinprecision.com/alloy-list.php>
- [21] Products. TAMBOLI CASTINGS LIMITED [online] © 2016 Tamboli Castings Limited [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://tcl.in/products/>
- [22] 2012 Casting Competition. Modern Casting. [online]. 2012, May [cit. 2016-04-29]. ISSN 0026-7562. Dostupné z: <http://content.yudu.com/A1wmtk/ModernCastingMay2012/resources/index.htm>
- [23] Products. CIREX [online]. CIREX, 2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://cirexfoundry.com/products/>
- [24] INVESTMENT CASTING GALLERY & PROCESS, PI Castings: [online]. Cheshire UK, 2016 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.pi-castings.co.uk/process.asp>
- [25] Case Studies. MILLER CASTINGS [online]. Whittier, CA, 2010 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.millercastings.com/category/case-studies/>
- [26] 2013 Casting Competition , Modern Casting[online]. 2013, **103**(June) [cit. 2016-04-30]. ISSN 0026-7562. Dostupné z: <http://content.yudu.com/A282be/ModernCastingJun2013/resources/index.htm>
- [27] Výrobky. Kdynium Kdyně a.s.[online]. KDYNIUMCZ, 2015 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.kdynium.cz/foto-vyrobky.aspx>
- [28] Photo gallery, Aristo Cast Investment casting[online]. © 2014 Aristo Cast Corporation [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.aristo-cast.com/>
- [29] REED, Roger C. *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-521-85904-2.
- [30] TMS. Superalloys: A Primer and History [online]. © 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.tms.org/meetings/specialty/superalloys2000/superalloyshistory.html>



- [31] LOSERTOVOÁ, Monika. Progresivní materiály: učební text [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2016-04-03]. ISBN 978-80-248-2575-5. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf>
- [32] MACHALA, J. *Nízkocyklová únava niklové superslitiny IN713LC s TBC vrstvou za vysokých teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.
- [33] SVOBODA, J.M. *Nickel and nickel alloys*, ASM Handbook. Volume 15 9th ed.: 816-823, [Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1988]. ISBN 9780871700216.
- [34] Yu, K, O; Beffel, M, J; Robinson, M; Goettsch, D, D; Thomas B, G, Pinella, D; Carlson, R, G. *SOLIDIFICATION MODELING OF SINGLE-CRYSTAL INVESTMENT CASTINGS*. Transactions of the American Foundrymen's Society. [online]. 1990(98), 417-428 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: [http://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/90\\_Solidification%20Modeling%20of%20Single-Crystal%20Investment%20Castings.pdf](http://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/90_Solidification%20Modeling%20of%20Single-Crystal%20Investment%20Castings.pdf)
- [35] All alloys, MegaMex [online]. MegaMex ©2010 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://megamex.com/alloy.htm>
- [36] THEVOZ, Philippe, Matthias GAUMANN a Marco GREMAUD. *The Numerical Simulation of Continuous and Investment Casting*. In: TMS [online]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2002 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0201/thevoz/thevoz-0201.html>
- [37] PRUIT, T. J., HANSLITS, M. J., *Cobalt based alloys*, ASM Handbook. Volume 15 9th ed.: 811-814, [Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1988]. ISBN 9780871700216.
- [38] Rolls-Royce Trent XWB In: Flug Revue [online]. © Motor Presse Stuttgart GmbH & Co [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://images.flugrevue.de/sixcms/media.php/11/thumbnails/XWB-Rolls-Royce%20Trent%20XWB.jpg.3307200.jpg>
- [39] Trent-32. In: SlideShare [online]. LinkedIn Corporation © 2016 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://image.slidesharecdn.com/trent3967/95/trent-32-728.jpg?cb=1184633317>
- [40] Shukman, David. A350 marks new phase in aero-engines: BBC News [online]. © 2016 BBC [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/science-environment-22889969>
- [41] Blades, Vanes. TURBINE CASTING SAS [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.turbine-casting.com/#>
- [42] Cast Superalloys. UNITED SUPERALLOYS [online]. United Superalloys © [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.unitedsuperalloys.com/cast-superalloys.html>

- [43] Products. Prague Cast [online]. Praguecast.cz, 2009 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.praguecast.cz/products.php>
- [44] Přesné odlitky. PBS Velká Bíteš [online]. První brněnská strojírna Velká Bíteš, a. s., ©2000-2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/sluzby-zakaznikum/presne-odlitky/vyrobn-program>