

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL - PROGRESIVNÍ SLÉVÁRENSKÁ TECHNOLOGIE

INVESTMENT CASTING - PROGRESSIVE FOUNDRY TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR BLAŽÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. VÍT MIKULKA

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Blažík

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Lití na vytavitelný model – progresivní slévárenská technologie

v anglickém jazyce:

Investment casting – progressive foundry technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled možností technologie vytavitelného modelu při výrobě vysoce sofistikovaných odlitků pro nejnáročnější zákazníky, například z leteckého a obranného průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je přinést rešerši aktuálních možností výroby sofistikovaných odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu z pohledu přesnosti tvaru, drsnosti povrchu a tvarové složitosti. Nedílnou součástí práce bude i přehled dosahovaných mechanických vlastností, které jsou důležité zejména pro odběratele z leteckého průmyslu (Airbus, Boeing).

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-6-9.
2. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
3. CILEČEK J., MIKULKA, V. Přesné odlitky pro letecký průmysl vyráběné metodou vytavitelného modelu. Slévárenství. 2011, roč. 59, č. 3-4, s. 85-86. ISSN 0037-6825.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vít Mikulka

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je přinést rešerši o současných možnostech technologie přesného lití při odlévání rozměrově přesných hliníkových odlitků za použití metody vytavitelného modelu. Práce se zabývá problematikou rozměrové přesnosti a kvalitou povrchu takto vyrobených odlitků. Dále se tato práce věnuje možnostem zvýšení mechanických vlastností úpravou slévárenského postupu. Nakonec tato práce popisuje speciální technologie používané při zhotovování přesných odlitků z hliníkových slitin pro letecký průmysl, jejich principy a dosahované materiálové charakteristiky.

Klíčová slova

přesné lití, vytavitelný model, progresivní slévárství, letecký průmysl

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis is to bring special retrieval about possibilities of investment casting technology used for casting dimensional accurate products from aluminum alloys together with lost-wax process. The thesis deals with problems of the dimensional accuracy and the surface quality of casts produced by this technology. Further a thesis is focused on possibilities of increasing mechanical properties by the modification of casting procedure. At the end a thesis describes special technologies used for casting dimensional accurate aluminum alloys products used in aerospace industry, their principle and reachable mechanical properties.

Key words

Investment casting, lost wax process, progressive casting, aerospace industry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BLAŽÍK, P. Lití na vytavitelný model – progresivní slévárenská technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vít Mikulka.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Lití na vytavitelný model - progresivní slévárenská technologie vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 24. 5. 2013

.....

Petr Blažík

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Vítu Mikulkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

<i>Abstrakt</i>	1
<i>Obsah</i>	6
<i>1 Úvod</i>	7
<i>2 Teoretická část</i>	8
2.1 Přehled světové produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu ...	8
2.1.1 Celosvětová situace v prodeji přesných odlitků v letech 2006 - 2009	8
2.1.2 Celosvětová situace v prodeji přesných odlitků v letech 2010 - 2011 v jednotlivých oblastech	10
2.1.3 Shmutí budoucí celosvětové ekonomické situace přesného lití	12
2.1.4 Situace v oblasti přesného lití v České republice.....	12
2.2 Přesné lití – metoda vytavitelného modelu	13
2.2.1 Princip metody	14
2.2.2 Formy na výrobu modelů	16
2.2.3 Voskové modely.....	17
2.2.4 Výroba keramických skořepin	18
2.2.5 Vytavení vosku z forem.....	19
2.2.6 Odlévání	19
2.2.7 Odstranění skořepiny	19
2.2.8 Dokončovací operace	20
2.3 Přesnost tvaru, drsnost povrchu a tvarová složitost odlitků	21
2.3.1 Tvarová přesnost	21
2.3.2 Drsnost povrchu a tvarová složitost.....	24
2.4 Zvyšování mechanických vlastností	27
2.4.1 Očkování.....	27
2.4.2 Modifikace.....	29
2.4.3 Odplynění	29
2.4.4 Vytvrzování	31
2.5 Technologie řízené krystalizace	33
2.5.1 Patent HERO Premium Casting	33
2.5.2 Technologie SOPHIA.....	36
2.6 Ukázky přesných odlitků a jejich aplikace v leteckém průmyslu	38
<i>Závěr</i>	43
<i>Použitá literatura</i>	44

1 ÚVOD

Pod pojmem progresivní slévárenství se rozumí potřeba vyvíjet nové technologie k usnadnění, zrychlení a zlevnění slévárenského postupu přesného lití za současného zvýšení materiálových charakteristik, lepší rozměrové variability a kvality povrchu.

Technologie přesného lití s pomocí metody vytavitelného modelu je pokládána za jednu z nejnáročnějších technologií ve slévárenství, která však nabízí největší rozmanitost tenkostěnných a přesných odlitků vyrobených například z hliníkových slitin a titanových slitin. Nachází uplatnění téměř ve všech průmyslových odvětvích a její produkty jsou velice žádané především v obranném a leteckém průmyslu.

Vzhledem k tomu, že některé aplikace odlitků, právě např. v obranném a leteckém průmyslu, mají opravdu vysoké požadavky na rozměrové přesnosti a především na mechanické vlastnosti přesných odlitků, je potřeba neustále vyvíjet nové technologie a postupy, jimiž lze dosáhnout vyšších materiálových charakteristik, přesnějších rozměrů, vyšší kvality povrchu a snížení hmotnosti.

Z tohoto důvodu byly vyvinuty technologie HERO a SOPHIA, které modifikují slévárenský postup přesného lití formou vytavitelného modelu. Tyto technologie garantují zákazníkovi oproti běžným slévárenským postupům vyšší mechanické vlastnosti při vyšší vnitřní homogenitě.

2 TEORETICKÁ ČÁST

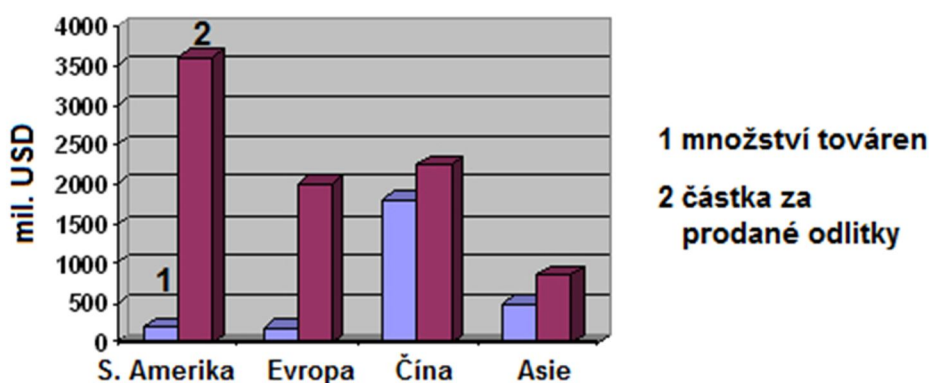
2.1 Přehled světové produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu

2.1.1 Celosvětová situace v prodeji přesných odlitků v letech 2006 - 2009

Rok 2006

V roce 2006 byly ve světě 4 dominantní země nebo regiony, které zásobovaly celý svět svými odlitky vyrobené metodou přesného lití: Čína, Asie, Severní Amerika, Evropa. Čína měla 61% všech továren po celém světě, 22% Asie, 9% S. Amerika a 7% Evropa. Zdálo by se, že země vlastníci nejvíce továren vykazuje také největší prodej, ale ve skutečnosti je tomu právě naopak, jak dokazuje graf na obrázku 2.2.1. Navzdory tomu, že se na území S. Ameriky nachází nejméně sléváren, měla S. Amerika největší zisk z prodaných odlitků. Naopak pro Čínu, na jejímž území jsou necelé 2/3 všech továren, znamenal zisk téměř o polovinu nižší než pro Ameriku.

Celosvětově se v roce 2006 prodaly odlitky za cenu 8,6 mld. USD. [1]

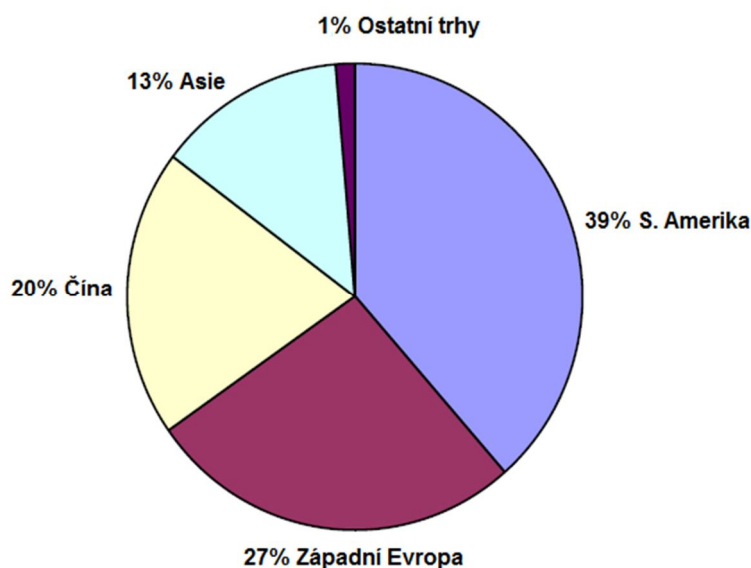


Obr. 2.1.1.1 Graf vyjadřující skutečnost mezi množstvím továren a prodanými odlitky [1]

Rok 2007 - 2009

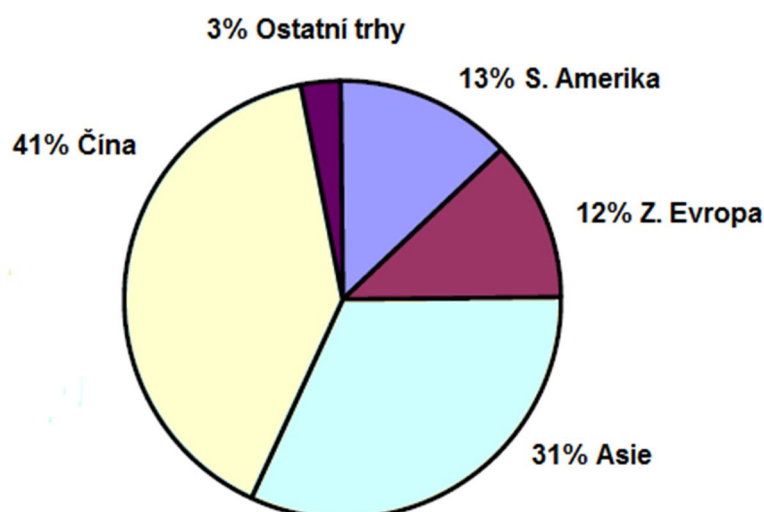
V roce 2007 byl oproti roku 2006 zaznamenán 23% nárůst v prodeji odlitků na 10.1 mld. USD, částečně z důvodu úpravy údajů, kdy do statistiky byla zařazena Indie mezi ostatní trhy, ale také díky vysoké ceně materiálu. Největší nárůst nákupu byl vypočítán v sektoru výroby s přidanou hodnotou. [2]

V roce 2008 byl nárůst velice slabý a to pouze o 2% na 10,5 mld. USD, především z důvodu toho, že výroba s přidanou hodnotou a zejména automobilový průmysl stagnovaly. Tato stagnace automobilového průmyslu negativně ovlivnila situaci v S. Americe a Evropě. Asie snížila svůj vývoz odlitků tím, že převedla některé své zakázky na západ. Největším důvodem byla však celosvětová ekonomická krize. [3]



Obr. 2.1.1.2 Prodej přesných odlitků dle regionů v roce 2008 [3]

Prudký ekonomický pokles by pozorován v roce 2009, kdy, dle statistik klesl celosvětový prodej odlitků o 12% na 9,2 mld. USD. V S. Americe a Evropě to činilo asi 15 - 20% pokles a v Asii 0 - 14%. K tomuto poklesu došlo v důsledku ekonomické krize v roce 2008, kdy většina průmyslů stagnovala. V leteckém průmyslu došlo k přeplánování objednávek, které zapříčinilo 15 - 20% propad v prodeji. Dále pak došlo k odkladu výroby Boeingu Dreamlineru i když počet objednávek zůstal stejný. V automobilovém průmyslu kde byl již celkově slabý prodej automobilů a nákladních vozů, došlo i k propouštění zaměstnanců a k dlouhodobým stávkám. Naopak v Číně i Asii došlo ke zvýšení prodeje v sektoru s přidanou hodnotou oproti předchozím rokům. [3]



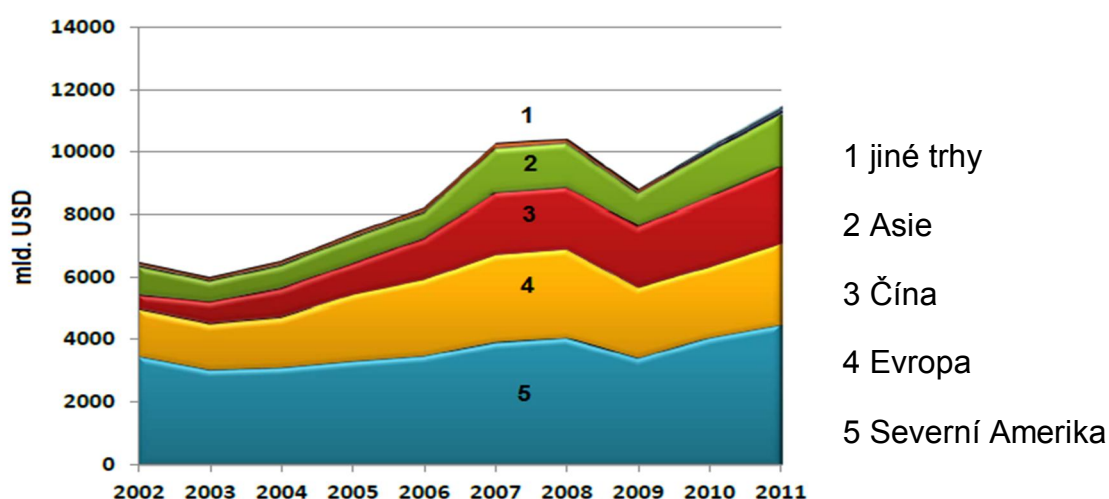
Obr. 2.1.1.3 Prodej přesných odlitků dle regionů v roce 2009 [3]

2.1.2 Celosvětová situace v prodeji přesných odlitků v letech 2010 - 2011 v jednotlivých oblastech

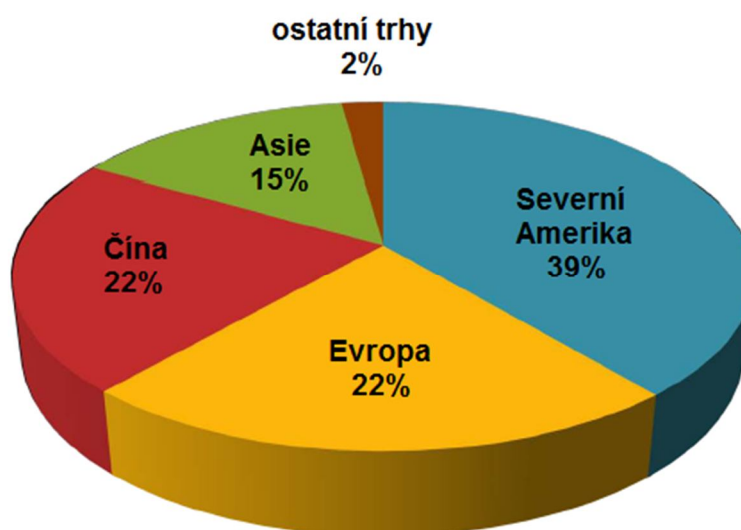
Rok 2010 - 2011

Navzdory velmi pomalému růstu ekonomik (HDP) v mnoha zemích se v roce 2011 zvedl celkový celosvětový prodej odlitků vyráběných technologií vytavitelného modelu na odhadovaných 11,4 mld. USD, což je asi 13% nárůst oproti roku 2010, kdy se prodaly odlitky za zhruba 10,1 mld. USD, což můžeme pokládat za velmi pozoruhodný výsledek. K tomuto nárůstu částečně dopomohly rozdíly v kurzech světových měn, celkové zdražení cen odlévaných slitin, avšak největší podíl nárůstu má celkové rozšíření průmyslu přesného lití. [4]

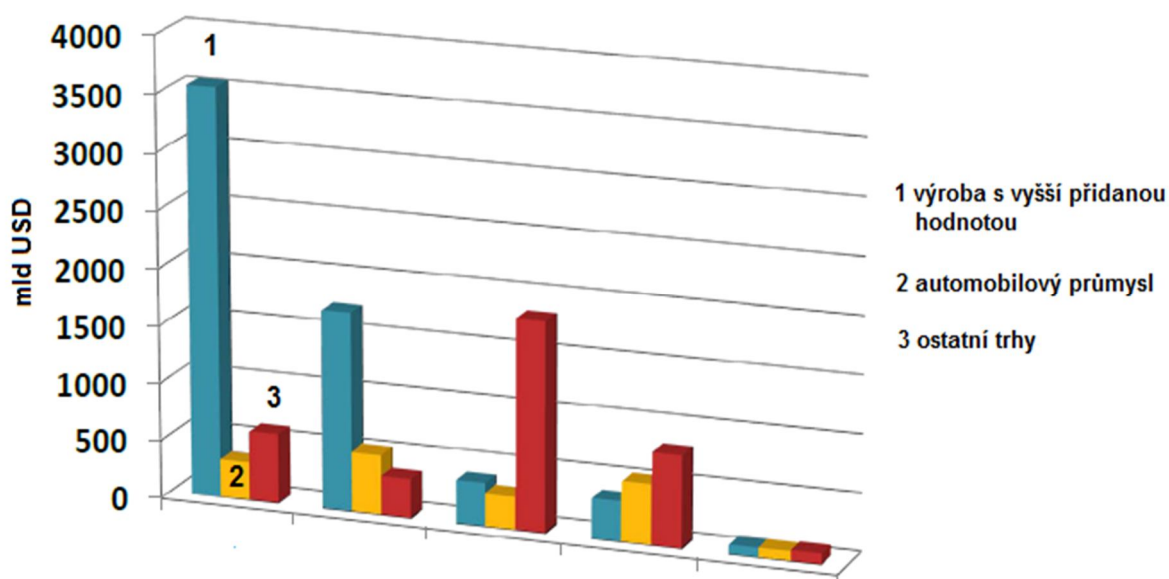
Na následujících obrázcích 2.2.1.1, 2.2.1.2, 2.2.1.3 uvidíme celosvětovou situaci v prodeji přesných odlitků



Obr. 2.1.2.1 Vývoj prodeje odlitků přesného lití dle regionu od roku 2002 (USD) [5]



Obr. 2.1.2.2 Prodej přesných odlitků dle regionů v roce 2011 [5]



Obr. 2.1.2.3 Prodej přesných odlitků podle zákaznických sektorů v roce 2011 [5]

Letecký průmysl

V tomto odvětví je prodej odlitků velice významný, protože jsou již zadány objednávky na 8 let dopředu. Díky tomu, že většina leteckých společností se snaží vybavit letadly s motory se sníženou spotřebou paliv, tak jen v roce 2011 Boeing doručil 477 letadel a dalších 805 je objednáno. Airbus doručil 534 a dalších 1419 je objednáno. Přestože výroba odlitků vyráběných v západních zemích vzrůstá, část nových objednávek směřuje do Číny, resp. Asie. [4,5]

Energetika – průmyslové plynové turbíny (IGT)

Energetický průmysl díky ekonomické krizi v roce 2008 stagnuje a je stále na nízké úrovni. Původní projekty na výstavbu elektráren byly zrušeny nebo jsou pozastaveny. Množství objednávek na odlitky přesného lití se pomalu začínají zvyšovat a předpokládá se nadále pomalé zlepšování do budoucna. [4,5]

Automobilní průmysl

V tomto důležitém sektoru prodej odlitků přesného lití neustále roste, především v Evropě a Asii. Vzhledem k tomu, že neustále roste počet aut využívajících turbodmychadla ke zvýšení efektivity a snížení spotřeby paliva, roste i počet objednávek na odlitky do těchto motorů. [4,5]

Ostatní sektory

S rostoucí a současně stárnoucí populací ve světě roste i potřeba protetických náhrad a s tím souvisejících lékařských nástrojů a diagnostických zařízení, čímž se lékařský průmysl drží na velmi dobré úrovni. Zdá se však, že růst zaznamenávají pouze rozvojové země, zatímco v západních zemích výrobci zůstávají na stejné úrovni. [4,5]

V komerčním sektoru se v Severní Americe a v Evropě neustále zvyšuje výroba odlitků s poměrně stálým poměrem dovozu a vývozu. V Asii bylo v poslední době hodně investováno do výroby odlitků do tohoto sektoru. Také je u výrobců novým trendem zvyšování jakosti odlitků. [4]

2.1.3 Shrnutí budoucí celosvětové ekonomické situace přesného lití

- mnoho regionů předpovídalo 7% vzrůst v prodeji odlitků přesného lití, zatímco IMF/Světová banka předpovídala 3,3% růst
- v leteckém průmyslu jsou objednávky na 8 let dopředu a očekávají se další nové trendy a objednávky od leteckých společností, což bude zaručovat neustálý přísun nových objednávek pro slévárny
- v energetickém průmyslu se očekává slabé zlepšení
- automobilový průmysl vzhledem ke své snaze zvýšit efektivitu a snížit náklady na provoz automobilů předpokládá pokračující vzrůst objednávek na odlitky přesného lití
- v komerčním sektoru se očekává pomalé zlepšení v prodeji
- celosvětově se očekává vyšší produkce odlitků v následujících letech a celkově dobrá budoucnost pro slévárny přesného lití [5]

2.1.4 Situace v oblasti přesného lití v České republice

V roce 2010 byl celkový prodej 55 mil. USD (930 mil. Kč), přičemž byl kurz 1 USD = 17 Kč. Celkem bylo 810 zaměstnanců ve všech slévárnách přesného lití.

V roce 2011 byly prodány odlitky za celkem 58 mil. USD (1 105 mil. Kč) při kurzu 1 USD = 19 Kč a 850 zaměstnanců bylo zaměstnáno ve slévárnách.

Nárůst prodeje odlitků v roce 2011 oproti 2010 je 5% v USD, ale 18 % v Kč. Tento rozdíl je zřejmý z rozdílnosti kurzů v obou letech. [4]

Statistiky z roku 2012 zatím ještě nejsou dostupné. Celkově se však dá říci, že rozvoj trhu s odlitky vyrobenými metodou přesného lití je v České republice dobrý a předpokládá se zhruba stejný růst i v příštích letech. [4]

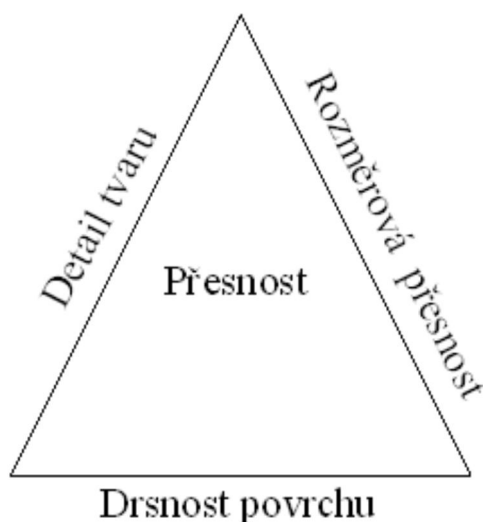
2.2 Přesné lití – metoda vytavitelného modelu

Metoda vytavitelného modelu si získala důležitou pozici na poli moderních technologií odlévání kovu. Řadíme ji mezi technologie „near-net-shape“ (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy při přeměně materiálu získáváme tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům. [6,7]

Podstatou přesného lití je vyrábět tvarově složité součásti, u nichž se některé funkční plochy vyrábí již při lití s takovou rozměrovou tolerancí a s takovou drsností povrchu, že není potřeba dokončování pomocí obrábění. Ostatní plochy, které je třeba obrábět, mají přídatky na obrábění relativně malé, což snižuje spotřebu času na jejich odstranění a snížení nákladů, které jsou zřetelně nižší než u jiných způsobů lití. [6-8]

Pomocí metody vytavitelného modelu jsme schopni odlévat téměř všechny materiály. Lze dokonce odlévat velmi reaktivní materiály jako je titan a jeho slitiny. Dále nabízí možnost výroby odlitků z obtížně obrobitelného materiálu, kde je výroba jinou technologií mimořádně nákladná nebo dokonce zcela nemožná. [6]

Na obrázku 2.2.1 je znázorněn poměr mezi přesností, rozměrovou přesností a kvalitou odlitku. Tyto tři vlastnosti určují potřebu dalšího obrábění. [7]

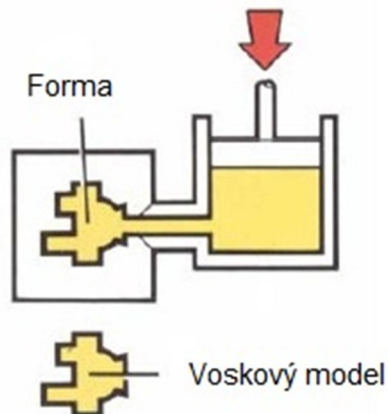


Obr. 2.2.1. Aspekty přesnosti u odlitku [7]

Odlitky vyrobené touto metodou nacházejí velké uplatnění v leteckém, vojenském, energetickém, automobilním průmyslu, v medicíně a dalších mnoha odvětvích.

2.2.1 Princip metody

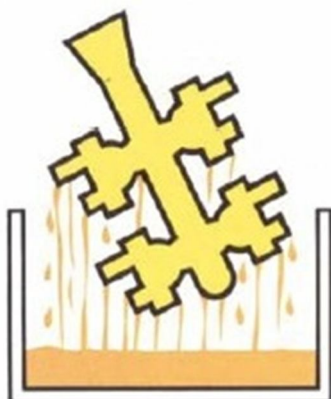
**Výroba voskového modelu vstřikováním
roztaveného vosku do formy**



**Sestavování voskového
stroměčku**



**Namáčení stroměčku v
keramické břechce**



**Posyp žáruvzdorným
materiálem**



**Po několikanásobném
namáčení, posypávání a
vysušování vznikne konečná
keramická skořepina**



Vytavení vosku z formy



Odlévání taveniny do
přehřáté skořepiny



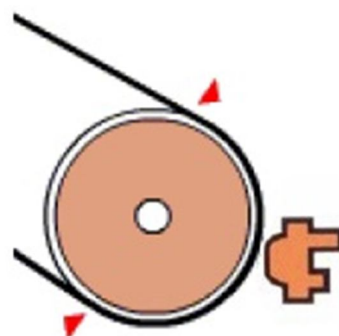
Odstraňování skořepiny
otryskáním (ocelovými
kuličkami, vodou)



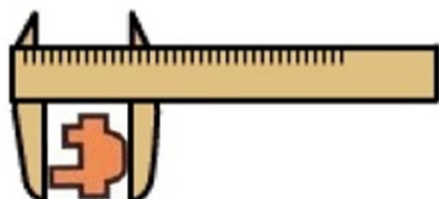
Oddělování odlitků od
vtokové soustavy



Obroušení odlitků od
zbytků vtokové soustavy



Kontrola rozměrové
přesnosti odlitků



Obr. 2.2.1.1 Princip metody přesného lití [7]

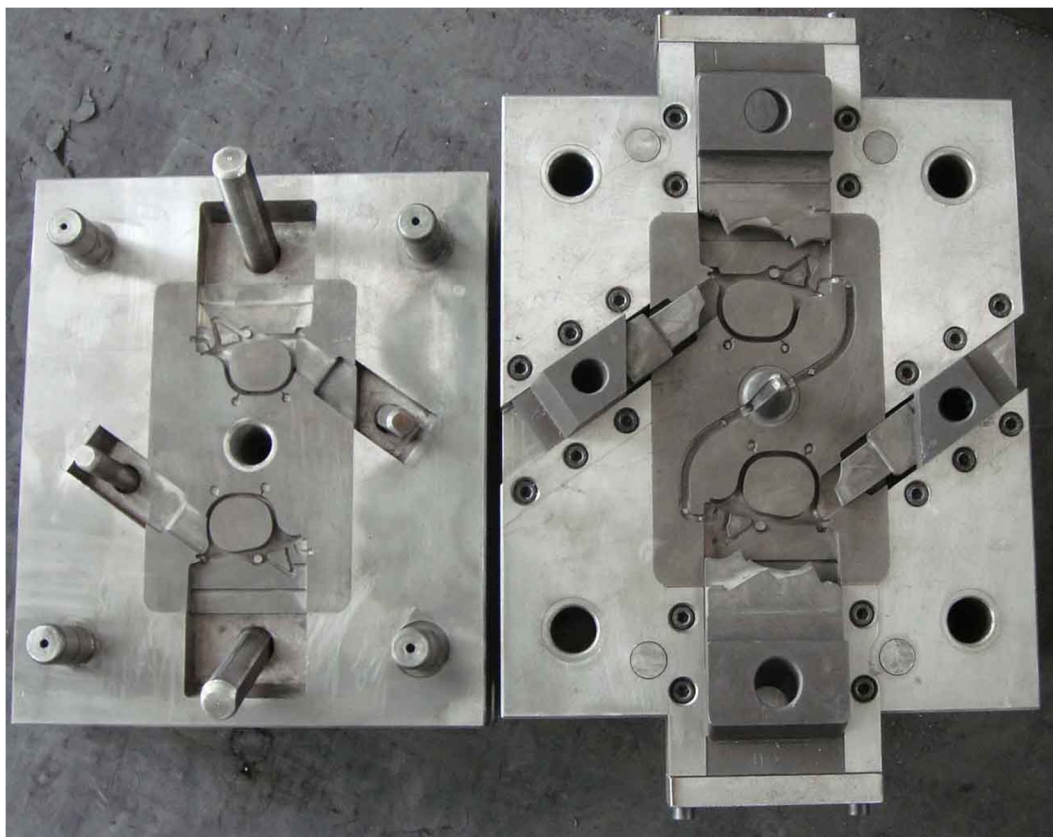
2.2.2 Formy na výrobu modelů

Výroba modelového zařízení neboli tzv. matečné formy je první důležitou operací při odlévání přesných odlitků. Tato modelová zařízení definují budoucí rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu budoucího odlitku, proto musí splňovat základní požadavky na vysokou rozměrovou přesnost a dokonalou kvalitu povrchu. [6,7,8]

Formy jsou převážně vyráběny obráběním a jejich kvalita obrobení má velký dopad na cenu a kvalitu odlitku. Při volbě modelového zařízení je potřeba uvést následující požadavky:

- odhadovaný počet kusů
- počet kusů v dávce
- koncové použití odlitku
- požadovaná kvalita odlitku [6]

Navržená forma pak musí umožnit výrobu rozměrově přesných voskových modelů s perfektním povrchem bez jakýchkoliv vad, jako jsou staženiny, vzduchové bubliny, propadliny atd. [8]



Obr. 2.2.2.1. Otevřená kovová forma pro přesné lití [11]

2.2.3 Voskové modely

K výrobě voskových modelů se používají voskové směsi, protože samotný vosk nesplňuje požadované vlastnosti na modelovou hmotu. Slévárenské vosky jsou komplexní vícesložkové směsi, které jsou složeny ze složek, jakou je syntetický vosk, přírodní vosk – uhlovodík, přírodní vosk – ester, přírodní a syntetická pryskyřice, montánní vosk, organické plnivo a voda, a jsou navrženy tak, aby ve finální fázi tvořily voskovou směs s vyhovujícími vlastnostmi pro slévání. [6,7,10]

Rozměry voskových modelů jsou oproti konečnému odlitku stanoveny s malými rozměrovými odchylkami, které kompenzují rozměrové změny v průběhu celého procesu viz. obr. 2.3.1.3 [6,8]

Nejdůležitější vlastnosti vosků

1. smršťování a kavitace
2. bod tání a tuhnutí
3. obsah popelovin
4. tvrdost a elasticita
5. viskozita
6. jakost povrchu
7. rychlost tuhnutí
8. odolnost vůči oxidaci
9. regenerace vosku
10. ostatní charakteristiky [6]

Roztavená vosková směs je vstřikovači vstříknuta do matečné formy, kde vychladne a dostane tvar odlitku. Vyjmutý model se pak připojí na vtokovou soustavu, která je také z vosku, kde s více přilepenými stejnými modely vytvoří tzv. voskový stromček. [10]



Obr. 2.2.3.1 Příklady voskových modelů [9]

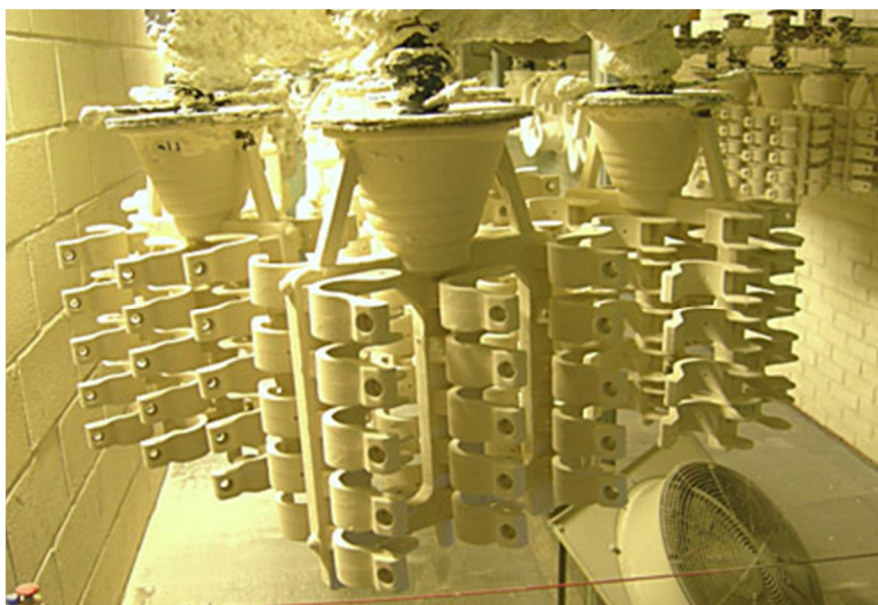
2.2.4 Výroba keramických skořepin

Keramická forma v přesném lití formou vytavitelného modelu je důležitým prvkem poskytujícím možnost vyrábět velkou škálu tvarově složitých odlitků a ještě větší výběr slitin. [6]

Výroba keramické skořepiny se provádí tak, že voskový stromeček ponoříme do tzv. keramické břechky tak, aby se hmota dostala do všech zákoutí a záhybů modelu. Keramická břecha se skládá z plniva a pojiva. Plnivo je žáruvzdorný materiál složený např. z křemenného skla, malachitu a zirkonu, který udává základní vlastnosti keramickým skořepinám. Další složkou břechky je pojivo, které musí zajišťovat po ztuhnutí dostatečnou pevnost po vysušení formy i po vypalování. Skládá se většinou z křemičitanových pojiv založených buď na lihu, nebo vodě. [6,7,9]

Stromeček se po namočení nechá okapat od přebytečné břechky a poté je vložen do sypače nebo fluidního lože, kde se nanáší vzduchem načeřený posypový materiál. Takto obalený stromeček se nechá vysušit ve velmi suché místnosti s relativní vlhkostí 30-60%, s proudícím vzduchem a se stálou teplotou např. $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. [6,7,9]

Proces obalování a vysušování se zpravidla provádí 4-12 krát v závislosti na tom, jak tvrdou a pevnou skořepinu požadujeme. Možná je také výroba keramických jader, pokud jsou zapotřebí. [9]



Obr. 2.2.4.1 Voskové stromečky v sušárně [13]



Obr. 2.2.4.2 Hotové keramické formy v sušící místnosti [13]

2.2.5 Vytavení vosku z forem

Vytavování vosku z keramických forem je prováděno několika různými způsoby. Obvykle se provádí teplotním šokem pomocí páry v boilerklávu. Tímto způsobem se dosáhne potřebné teploty v krátkém čase, tudíž se zamezuje praskání keramického obalu v důsledku velké teplotní roztažnosti vosku a malé teplotní roztažnosti keramické skořepiny. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.3, vosky jsou regenerativní, tudíž se po regeneraci mohou použít pro novou tvorbu modelů. [7,9]

2.2.6 Odlévání

Před samotným odléváním je třeba skořepiny vypálit a ihned do nich odlévat, aby se zabránilo vysokým teplotním šokům, neboť by mohlo dojít k praskání skořepiny. Hliník se nikdy neodlévá v čisté formě, ale v kombinaci s mědí a dalšími přísadovými prvky. Mezi základní typy slitin hliníku patří například Al-Si, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si, Al-Cu-Ni. V těchto slitinách se mohou také navíc vyskytovat další přísadové prvky, zejména Mn, Ti, Co, Zn. [6-9]

2.2.7 Odstranění skořepiny

Po odlití a vychladnutí kovu je potřeba zbavit se nepotřebné keramické vrstvy, která se odstraňuje většinou mechanicky. Nejčastější metodou je metoda vibrační, kdy se odlitek stále obalený v keramické formě upevní do vibrační zvukotěsné kabiny, kde je následnými vibracemi skořepina odstraněna z odlitku. Druhou nejčastější metodou je ostříkování vysokotlakým proudem vody, která je schopna odstranit veškeré zbytky formy i v těch nejnedostupnějších místech. Další možnou metodou je tryskání skořepiny ocelovými kuličkami. Tento proces má však své

omezení, neboť kuličky zanechávají v odlitcích „mikrodůlky“ s částicemi oceli, což má výrazně negativní efekt na rozměrovou přesnost a drsnost povrchu. [6,7]

2.2.8 Dokončovací operace

Jelikož po odlití do formy má odlitek tvar voskového stroměčku, je potřeba jednotlivé části odřezat a následně zabrousit zbytky vtokové soustavy a odstranit všechny ostatní povrchové vady tak, aby odlitek rozměrově a kvalitativně splňoval požadavky zákazníka.

Ještě předtím, než se odlitky vyexpedují, je třeba provést jak rozměrovou kontrolu, kontrolu jakosti a kvality povrchu, tak i kontrolu mechanických vlastností, RTG atd. opět v závislosti na požadavku zákazníka. [6]



Obr. 2.2.6.1 Ukázka ručního odlévání do skořepiny [15]

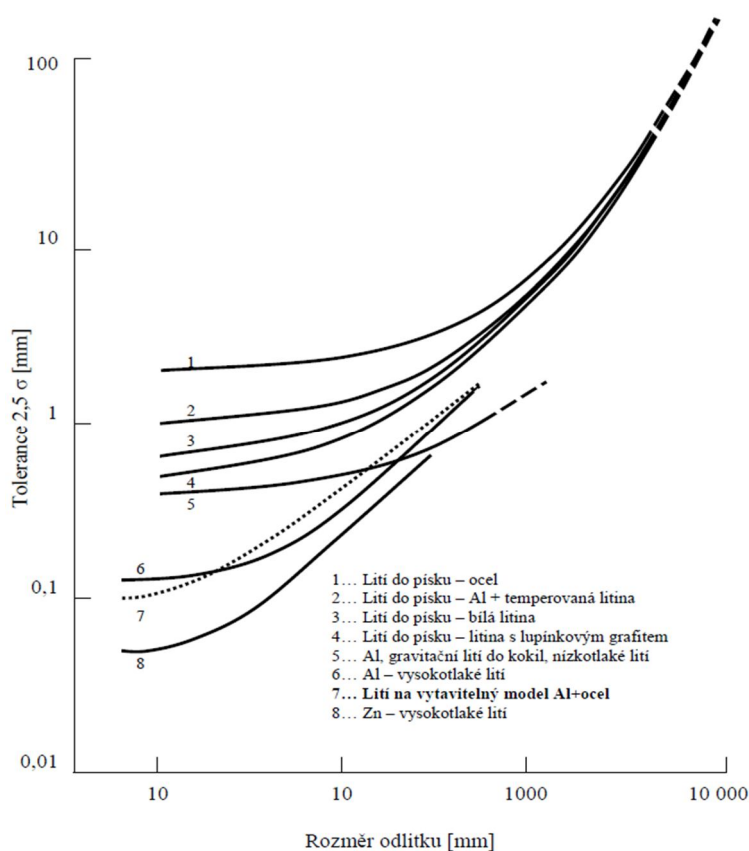
2.3 Přesnost tvaru, drsnost povrchu a tvarová složitost odlitků

2.3.1 Tvarová přesnost

Jak již bylo zmíněno v kap. 2.2, metodu přesného lití řadíme mezi technologie near-net-shape, což znamená, že již po odlití bude mít odlitek přesný tvar dle výkresu a další úpravy obráběním se u něj nepředpokládají. [16]

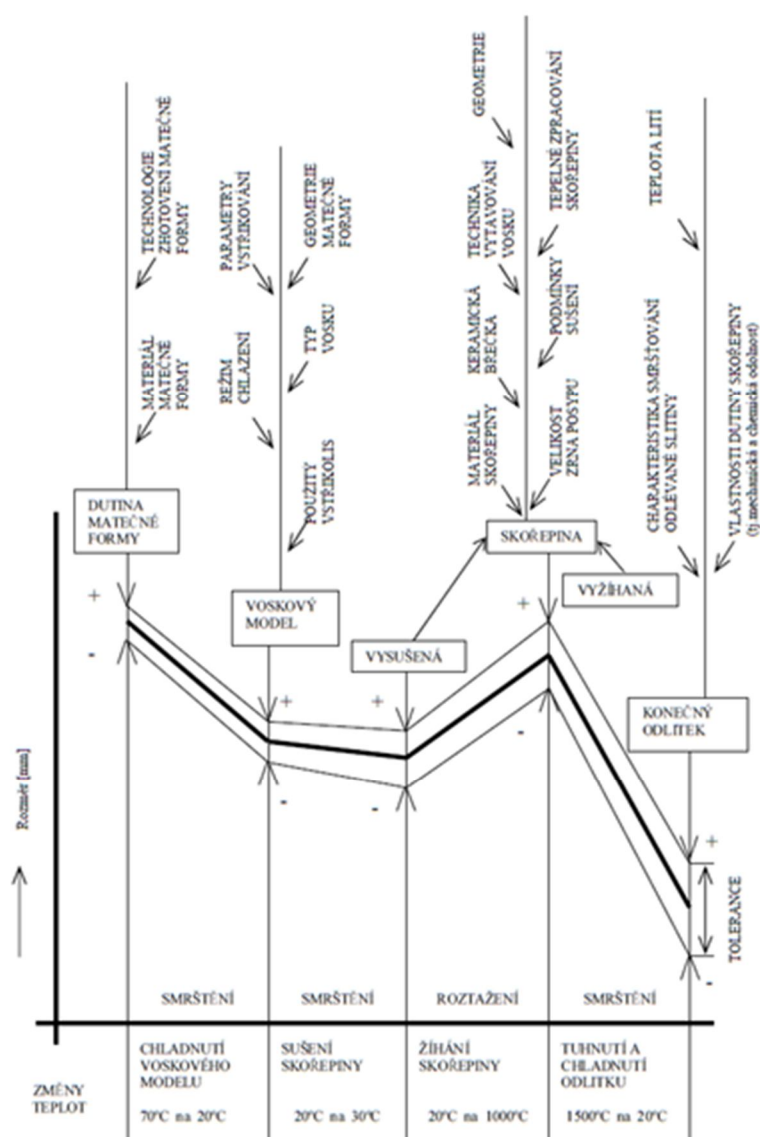
Chyby přesnosti odlitku vznikající při výrobě dělíme na systematické a náhodné. Systematickým chybám, jako jsou např. neuvedení tolerancí na výkresech nebo rozdílnost smršťování voskového a kovového materiálu, se můžeme poměrně snadno vyhnout dodržováním přesného výrobního postupu, zatímco náhodné chyby vznikají, jak již název napovídá, náhodně a je velice obtížné je předpovídat a následně jim předejít. [17]

Ačkoliv nazýváme tuto metodu přesným litím, nikdy nebudeme schopni vyrobit dva rozměrově identické odlitky. Toto platí pro všechny výrobky vyráběné ostatními technologiemi, včetně přesného obrábění. Dle norem ISO pro rozměrové tolerance odlitků zjistíme, že každá technologie dosahuje jiných přesností. Pro všechny však platí, že čím větší je jmenovitý rozměr odlitku, tím větší jsou potřeba tolerance, což lze vidět z grafu na obr. 2.3.1.1 [16]



Obr. 2.3.1.1 Závislost velikosti tolerance na jmenovitém rozměru odlitku dle Campbella [16]

U metody přesného lití je třeba znát chování voskového modelu při jeho výrobě, vstřikování a následném tuhnutí. Jak již bylo zmíněno v kap. 2.2.3, voskový model se při tuhnutí smršťuje a je tedy potřeba počítat s přírůstkem materiálu, aby se vykompenzovalo objemové smršťování. To samé platí pro výrobu keramické skořepiny. Je třeba znát, jak se materiál chová při výrobě a i při samotném odlévání. Před odlitím se skořepina žihá a smršťuje se, s čímž je třeba také počítat, abychom zachovali rozměrovou přesnost finálního odlitku. V neposlední řadě je potřeba počítat se samotným smršťováním odlévaného kovu při jeho tuhnutí. K odstranění smršťování materiálů při těchto procesech je nutno posuzovat smršťování třídímní, nikoliv lineárně, protože nedochází k rovnoměrnému smršťování délky, šířky a tloušťky. Téměř v každé fázi tohoto procesu, jak můžeme vidět na obr. 2.3.1.2, je třeba počítat s vlivy snižující přesnost odlitku. [16]



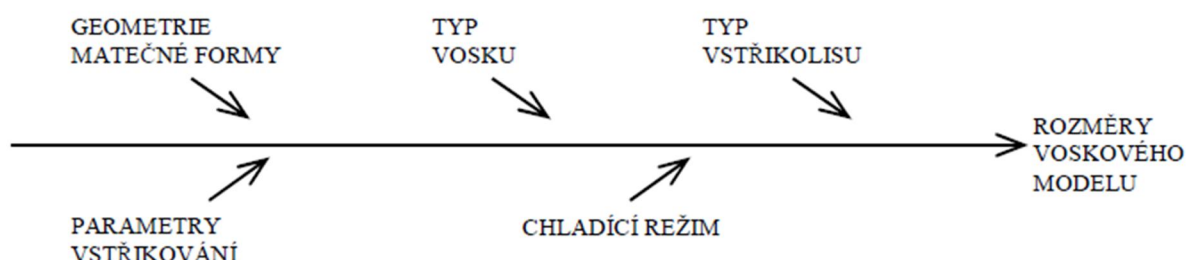
Obr. 2.3.1.2 Změny rozměrové přesnosti v jednotlivých fázích celého procesu [16]

Největší vliv na rozměrovou přesnost odlitků při výrobě, mají následující na sebe navazující fáze výroby:

1. výroba voskového modelu dle matečné formy
2. výroba keramické formy dle voskového modelu
3. výroba odlitku dle keramické formy [16]

1. Fáze - výroba voskového modelu dle matečné formy

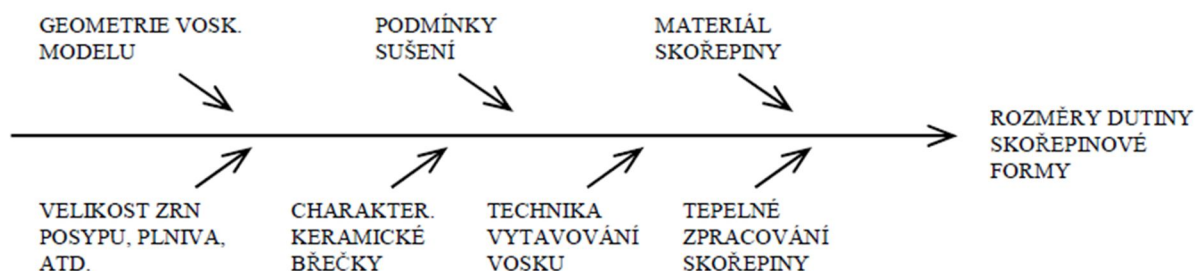
Rozměrová přesnost matečné formy je dána zvolenou technologií výroby. Rozměrová přesnost voskového modelu, který je nejčastěji vyráběn metodou vstřikování, závisí na zvolených parametrech vstřikování tekutého vosku do matečné formy. Jedinou možností ovlivňování změny rozměrové přesnosti voskového modelu je změna vstřikovacích parametrů. [16]



Obr. 2.3.1.3 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost voskového modelu [16]

2. Fáze - Výroba formy skořepiny dle voskového modelu

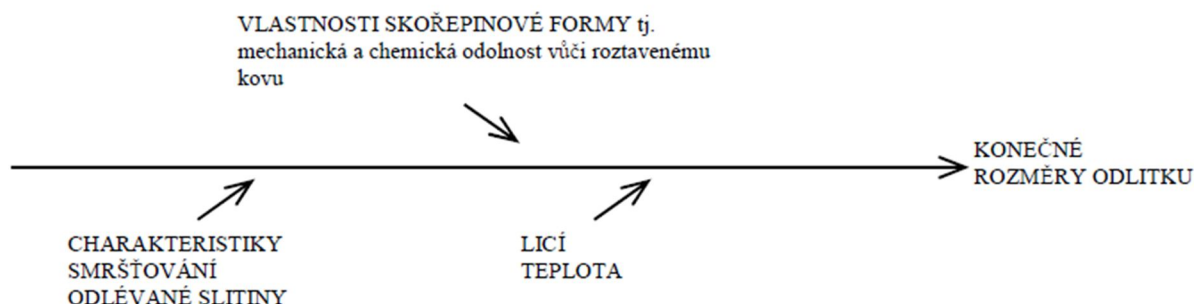
V této fázi jsme schopni ovlivnit rozměrovou přesnost finálního odlitku správnou volbou keramické břečky a posypového materiálu a dále pak následným sušením a žíháním skořepiny. [16]



Obr. 2.3.1.4 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost keramické formy [16]

3. Fáze - Výroba odlitku dle keramické formy

Při samotném odlévání je nejvíce rozhodujícím faktorem smršťování odlévané slitiny, které je dáno jejím chemickým složením a zvolenou teplotou lití. Licí teplota velmi závisí na tvarové složitosti odlitku a tloušťce stěn a je třeba ji udržovat v optimálních hodnotách, neboť může dojít k výskytu vad, jakými jsou staženiny, řediny a nezabíhavost. [16]



Obr. 2.3.1.5 Faktory ovlivňující rozměrovou přesnost odlitku [16]

2.3.2 Drsnost povrchu a tvarová složitost

Drsnost povrchu odlitků vyráběných metodou přesného lití dosahuje 1,6 - 25 μm . Jsou-li požadavky zákazníka na menší drsnost povrchu, je třeba odlitek dále obrobit (broušení, leštění). Podrobnější přehled drsností povrchů můžeme vidět níže v tabulce 2.3.2.1. [18]

Z níže uvedené tabulky 2.3.2.1 vyplívá, že metoda přesného lití ve srovnání s ostatními metodami dosahuje nejlepších možných parametrů a při velké variabilitě rozměrů a hmotnosti i tloušťce stěn. Také zaujímá 1. místo v dosahované drsnosti povrchu, což z ní činí jednu z nejlepších metod pro výrobu rozměrově přesných odlitků s požadavky na vysokou kvalitu povrchu a tvarovou složitost.

Metoda lití	Rozměry (mm)	Tolerance IT	Hmotnost (kg)	Tloušťka (mm)	Drsnost Ra (μm)
Pískové formy	5 až 5 . 10 ³	15	2 . 10 ⁻² až 3 . 10 ⁵	3 až 600	12,5 až 200
Skořepinové formy (Croning)	2 až 5 . 10 ²	13	0,2 až 150	2 až 40	6,3 až 25
Sádrové formy	1 až 5 . 10 ²	12	0,1 až 15	1 až 20	1,6 až 12,5
Vakuové formy	5 až 3 . 10 ³	14	0,1 až 10 ³	2 až 200	12,5 až 200
<u>Vytavitelný model</u>	<u>5 až 2 . 10³</u>	<u>10</u>	<u>10⁻³ až 10²</u>	<u>0,2 až 20</u>	<u>1,6 až 25</u>
Spalitelný model	10 až 5 . 10 ³	12	1 až 10 ⁵	2 až 600	12,5 až 100
Keramické formy (Shaw)	1 až 5 . 10 ²	13	1 až 10 ³	2 až 40	3,2 až 25
Kokily	50 až 10 ³	12	1 až 10 ³	2 až 600	3,2 až 25
Odstředivé lití	50 až 10 ⁴	12	0,5 až 5 . 10 ³	5 až 500	6,3 až 25
Nízkotlaké lití	50 až 10 ³	12	0,5 až 10 ³	2 až 50	3,2 až 12,5
Vysokotlaké lití	1 až 2 . 10 ³	10	10 ⁻³ až 15	0,4 až 15	1,6 až 12,5

Tab. 2.3.2.1 Přehled dosahovaných parametrů u různých technologií odlévání [18]

Kvalitu povrchu můžeme ovlivnit převážně způsobem odstraňování keramické skořepiny. Existuje několik způsobů, jak skořepinu odstraňovat. [6,7]

Tryskání

Tento proces se provádí v přístrojích nazývaných tryskače. Jde o komoru, do které se vloží několik keramických forem s již odlitým a ztuhlým kovem, které jsou pak následně bombardovány ocelovými kuličkami, které ve vysoké rychlosti narážejí do keramické skořepiny a tím ji rozbíjejí. Ačkoliv je tato metoda velmi účinná a rychlá, její velkou nevýhodou je značné zhoršení drsnosti povrchu odlitku. Používá se především u odlitků, u kterých nejsou vysoké požadavky na kvalitu povrchu. [6,7]

U odlitků s většími požadavky na kvalitu povrchu je třeba použít jinou metodu k odstranění skořepiny, např. vibrační metodou, nebo tryskáním vysokotlakým proudem vody. [6,7]



Obr. 2.3.2.2 Závěsný tryskáč SPH 2-8,5/15 od firmy DISA (vlevo) Bubnový tryskáč BB170 (vpravo) [19]

2.4 Zvyšování mechanických vlastností

Vzhledem k tomu, že některé průmysly vyžadují odlitky přesného lití s lepší kvalitou a jakostí a vysokými mechanickými vlastnostmi, je potřeba sléváný materiál upravit tak, aby splňoval dané požadavky.

Označení slitiny			Mechanické vlastnosti									
VDS	číselné	chemické	Stav slitiny	R _m (MPa)	R _{p0.2} (MPa)	A ₅₀ (%)	HBS	Stav slitiny	R _m (MPa)	R _{p0.2} (MPa)		
Slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi												
	EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi	Kovová forma	T4	320	200	8	95	Písková forma	T4	300	200
	EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti		T6 T64	330 320	220 180	7 8	95 90		T6 T64	300 280	200 180
	EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3		T6 T64	290 250	210 180	4 8	90 80		T6	230	190
	EN AC-4220	EN AC-AlSi7Mg0,6		T6 T64	320 290	240 210	3 6	100 90		T6	250	210
	EN AC-4330	EN AC-AlSi9Mg		T6 T64	290 250	210 180	4 6	90 80		T6	230	190
	EN AC-44400	EN AC-AlSi11		L	170	80	7	45		L	150	70

Tab. 2.4.1 Mechanické vlastnosti na odděleně litých zkušebních kusech dle normy ČSN EN 1706 [14]

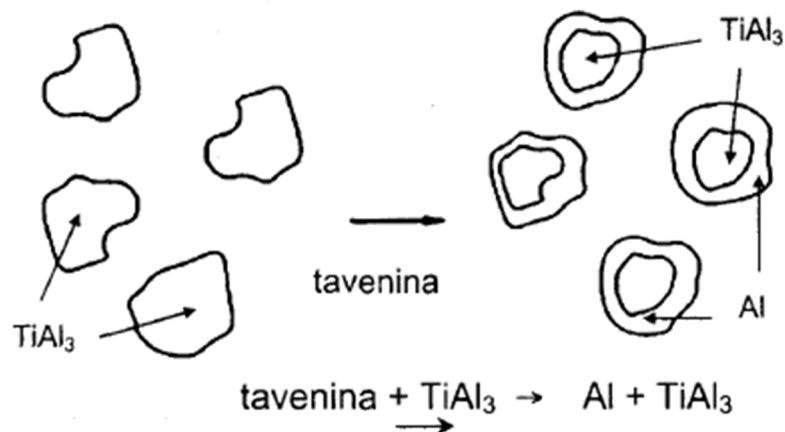
Označení slitiny			Mechanické vlastnosti						
Chemické označení	Norma	Norma ČSN	Tepelné zpracování	R _m MPa	R _p MPa	A5 mm %	Tvrdost HB	E MPa v tis.	Barevné označení
AlSi7Mg0,4	A356.0	42 43 34	T6	265	195	4	75	70 - 75	bílá - žlutá
AlSi7Mg0,6	A357.0	42 43 34	T6	320	270	5	80	-	bílá - žlutá
AlSi10MgMn	DIN 239	42 43 31	T6	230	170	1	75	-	bílá - modrá
AlCu4Ti	A201	-	T6	280 - 360	180 - 230	3 - 6	85 - 130	-	
AlCu5Ni	A203	42 43 16	T6	240	-	1 - 2	85	-	

Tab. 2.4.2 Mechanické vlastnosti dosahované slévárnou přesného lití Alucast [20]

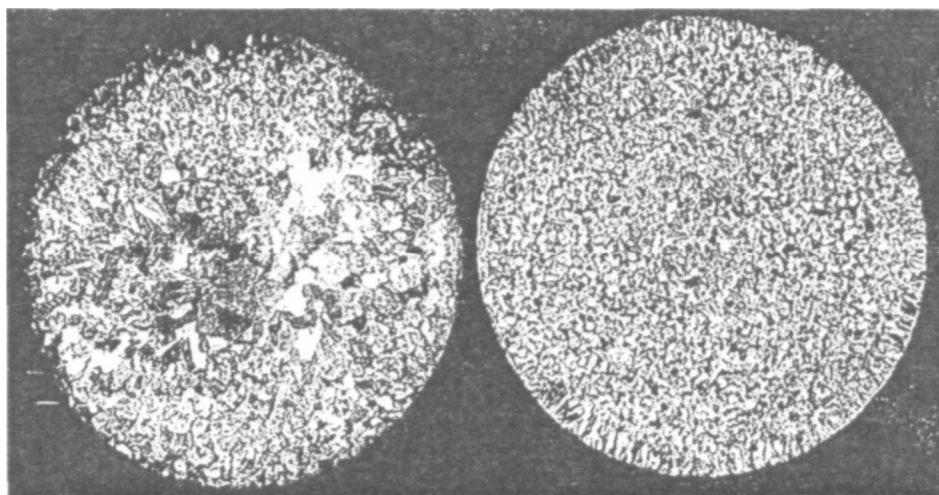
2.4.1 Očkování

Hrubozrnná struktura hliníkových slitin je nežádoucí, kvůli špatným mechanickým vlastnostem a také horší obrobiteľnosti, proto se provádí očkování. [21]

Očkování se provádí u podeutektických slitin za účelem zjemnění struktury slitiny a to tak, že přidáním očkovacích látek se zvýší tvorba nukleačních zárodků. Zvýšená tvorba nukleačních zárodků má za následek rovnoměrné rozložení mikrostaženin a ředin, zatímco u neočkovaných slitin se vytváří soustředné staženiny a oblasti s vysokou koncentrací ředin. Očkování slitin hliníku se provádí nejčastěji titanem nebo kombinací titanu a bóru, které jsou do taveniny přidány ve formě očkovacích solí (např. K₂TiF₆, KBF₄ a dalších), očkovacích tablet nebo v podobě předslitin Al-Ti nebo Al-Ti-B. Očkovací tablety obsahují směs očkovacích solí v různých kombinacích a koncentracích. Dávky jsou většinou v množství 0,1 – 0,4% hmotnosti taveniny. [22]



Obr. 2.4.1.1 Nukleace zárodků Al kolem očkovadla TiAl_3 [22]



Obr. 2.4.1.2 Vliv očkování na velikost zrna slitiny Al-Si₇ (vlevo neočkováná slitina, vpravo po očkování Al-Ti) [22]

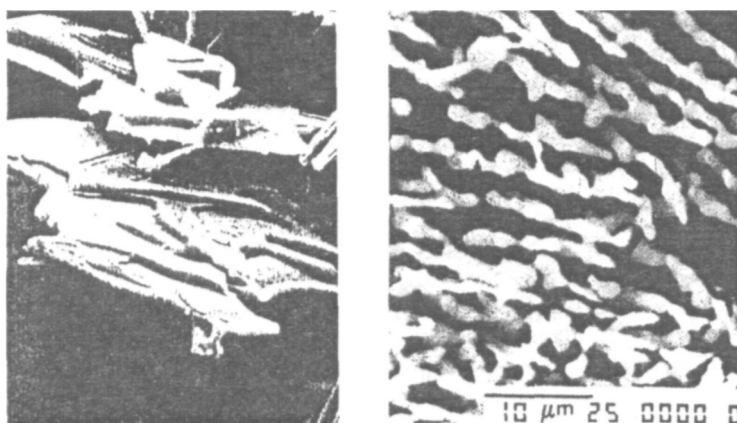
Vliv očkování na vlastnosti slitin

Zjemnění zrna hliníku má velký vliv na zvýšení mechanických i technologických vlastností: [22]

- zvýšení pevnosti a tažnosti
- menší pravděpodobnost vzniku trhlin ve slitině
- menší pórovitost odlitků
- zvýšení těsnosti odlitků
- lepší obrobiteľnosť
- zvýšení vlastností po tepelném zpracování
- zlepšení kvality povrchu po anodické oxidaci [22]

2.4.2 Modifikace

Modifikací se výrazně zvyšují mechanické vlastnosti, zejména tažnost. Provádí se u eutektických slitin hliníku, kde je struktura tvořena eutektikem. Pro dosažení maximálních mechanických vlastností odlitků je třeba ovlivňovat především morfologii křehkých částic eutektického křemíku, a to tak, že aplikujeme tzv. modifikační přísady. Nejúčinnější přísadou je sodík, dále pak stroncium, baryum, antimon a draslík. Tyto přísady se do tekutého kovu přidávají buď ve formě kovu (čistý, nebo ve formě předslitiny) nebo jako soli, které potřebný kov uvolňují nebo v kombinaci kov + sůl. [14,22]



Obr. 2.4.2.1: Struktura křemíku v nemodifikovaném (vlevo) a v modifikovaném (vpravo) eutektiku [22]

Vliv modifikace na vlastnosti hliníkových slitin

Mechanické vlastnosti u modifikovaných slitin jsou závislé na dosažené struktuře eutektika. Platí, že čím je struktura kovu jemnější, tím lepší jsou mechanické vlastnosti slitiny. Modifikací se především zvyšuje tažnost až o 10%, zatímco pevnost v tahu se příliš nezvyšuje. Houževnatost a rázovou pevnost můžeme až o několik set procent zvýšit následným tepelným zpracováním. [21,22]

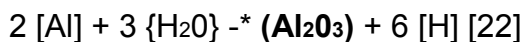
Vliv modifikace na slévárenské vlastnosti

- snížení sklonu ke vzniku trhlin
- nevýrazné zhoršení zabíhavosti
- snížení sklonu ke vzniku soustředěných staženin, zvýšení rozsahu ředin a mikrostaženin [22]

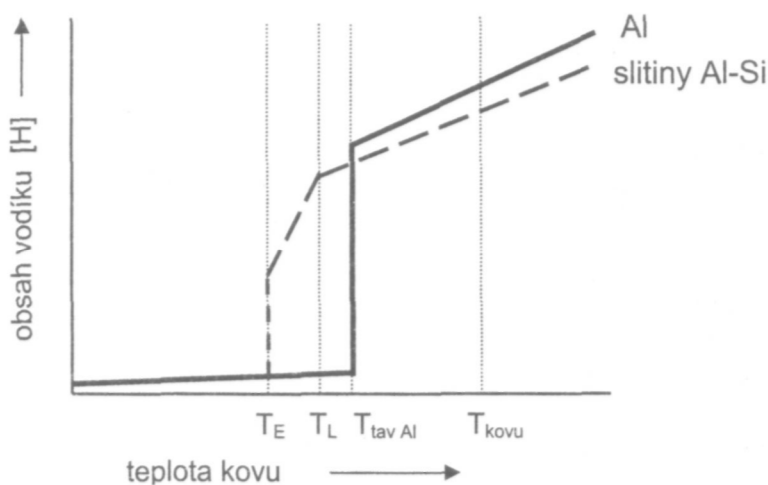
2.4.3 Odplynění

Vodík je jediným plynem, který se velmi dobře rozpouští právě v tekutém hliníku. Při tavení se vodík uvolňuje z vlhkého vzduchu v pecní atmosféře, ze solí, vyzdivek, špatně vysušených kelímků a z vlhkého nářadí, což způsobuje naplynění, která má výrazně velký vliv na pórovitost odlitku. [22]

Při styku taveniny s vodní párou dochází ke štěpení atomů vody, kdy vzniká vodík a kyslík. Kyslík spolu s hliníkem vytvářejí oxid hlinitý a samostatný vodík se v tavenině rozpouští a způsobuje naplynění, které je potřeba eliminovat. Reakce probíhá podle rovnice:



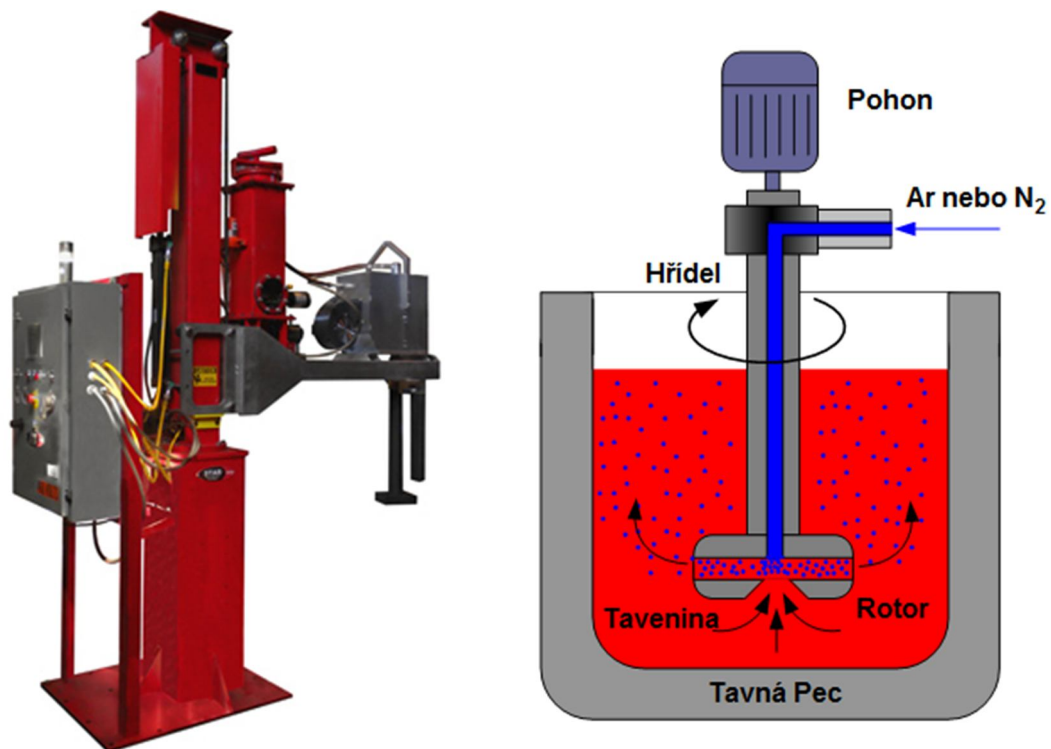
Velkému naplynění taveniny se můžeme vyhnout správným skladováním rafinačních a krycích solí v suchu a před odléváním je ještě vysušit při teplotách kolem 200°C. Stejně tak je potřeba, aby nové tavící kelímky a nové vyzdívky byly před použitím řádně vysušeny a přehřáté do červeného žáru. Kovové nářadí používané při odlévání musí být opatřeno nátěry a taktéž řádně vysušeno. [22]



Obr. 2.4.3.1 Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a slitinách Al-Si [22]

Princip odplyňování

Odplyňování se nejčastěji provádí probubláváním taveniny plyny, do jejichž bublin vodík difunduje. Nejčastěji používanými plyny jsou dusík a argon. Tyto plyny se přístrojem vhání do taveniny tak, aby bubliny probublávající taveninou byly co nejmenší. Cestou bubliny zachycují vodík a ten je společně s nimi vynášen na hladinu. K tomuto procesu slouží speciální přístroje, kterým se říká odplyňovače. [22]



Obr. 2.4.3.2 Odplyňovací přístroj od firmy STAR (vlevo), princip rotačního odplyňovače (vpravo) [23,24]

2.4.4 Vytvrzování

Zvýšení meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti můžeme dosáhnout tepelným zpracováním. Nejčastěji používaným typem tepelného zpracování je u hliníkových slitin vytvrzování za tepla. [22,25]

Princip vytvrzování

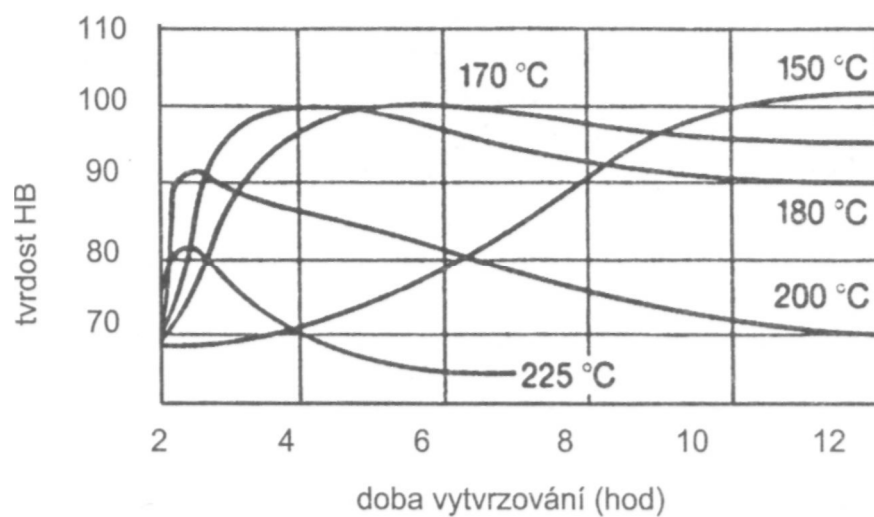
Vytvrzování zajišťuje přítomnost přísadového prvku, který způsobuje dostatečnou změnu rozpustnosti tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$, například Cu a Mg, případně Ni nebo Zn. Jejich obsah v tavenině musí být vyšší, než je jejich rozpustnost při normální teplotě a nižší než je maximální rozpustnost v $\alpha(\text{Al})$ při eutektické teplotě. [22,26]

Postup tepelného vytvrzování

- 1) rozpouštěcí žíhání neboli tzv. rekrystalizační žíhání provádíme za cílem snížit chemickou heterogenitu a vnitřní pnutí v kovu a dosáhnout homogenního roztoku $\alpha(\text{Al})$
- 2) rychlým ochlazením ve vodě dostaneme přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$
- 3) precipitační vytvrzování, neboli také stárnutí, je proces, při kterém dojde k tvorbě precipitačních částic, které blokují pohyb dislokací a dojde ke zpevnění struktury, tedy zvýšení tvrdosti a meze pevnosti [22,25]



Obr. 2.4.4.1 Postup tepelného vytvrzování [22]



Obr. 2.4.4.2 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [22]

2.5 Technologie řízené krystalizace

Rychlé a řízené tuhnutí taveniny neboli také rapid solidification proces, je velice důležitým aspektem při odlévání vysoce náročných odlitků. Jde o urychlení tuhnutího procesu taveniny ve formě, ihned po jejím odlití. Všeobecně se provádí mnoha různými způsoby, ale pro letecký průmysl byl speciálně vyvinut patent HERO a technologie SOPHIA. Urychlené tuhnutí taveniny zajišťuje mnohem lepší mechanické vlastnosti, než můžeme dosáhnout klasickými způsoby, viz kapitola 2.3. Tyto patenty jsou používány nejvýznamnějšími slévárnami, které jsou hlavními dodavateli těchto vysoce náročných odlitků pro letecký průmysl.

2.5.1 Patent *HERO Premium Casting®*

Tuto technologii si nechala patentovat německá společnost Titan-aluminium-feinguss GmbH v Bestwigu v roce 1993. Firma Tital sídlící také v německém Bestwigu, která je součástí výše zmíněné společnosti, tohoto patentu využívá právě při výrobě odlitků pro letecký průmysl. [27,28]

Princip patentu HERO

Vzhledem k tomu, že keramické formy mají špatnou tepelnou vodivost, dochází k dlouhému časovému intervalu při tuhnutí kovu ve formě, což způsobuje vznik hrubozrné struktury, která má za následek snížení mechanických vlastností odlitku. [27]

Řešení rychlejšího tuhnutí taveniny ihned po odlití do formy, které má za následek tvorbu jemnozrné struktury, zajišťuje právě patent Hero, který spočívá v tom, že při výrobě odlitků metodou přesného lití dochází k úpravě slévárenského postupu a to tak, že ihned po odlití se keramická forma s roztaveným kovem pomalu ponořuje do speciální chladicí kapaliny, která musí mít nižší teplotu bodu varu, než je lící teplota taveniny. Při ponořování dochází k tomu, že tekutý kov tuhne u dna lící formy směrem nahoru. Rychlost ponořování se pohybuje mezi 10-200 mm/min. Zahřátá chladicí kapalina je přitom kontinuálně odváděna a ochlazená přiváděna zpět. [27]

Část lící formy, která je nad hladinou kapaliny, se ochlazuje velmi pomalu, dochází tedy k tomu, že odvod tepla z těchto částí se uskutečňuje přes již ochlazený kov a přes stěnu lící formy, která je již ponořena v chladicí kapalině a také přes páru procházející stěnou formy. Následkem tohoto cíleného odvodu tepla se vytvoří tzv. tuhnutí fronta, která je hranicí mezi ztuhlým kovem a kovem který obsahuje ještě nějaké procento taveniny. Souměrně s hladinou ponoření se i tuhnutí fronta pomalu pohybuje směrem ode dna k volnému povrchu taveniny. Takto jsme schopni docílit usměrněného tuhnutí veškeré taveniny. Při ponořování také dochází k penetraci chladicí kapaliny do porézní stěny formy skrze celou její tloušťku. [27]

Ačkoliv tímto způsobem zajistíme rychlé tuhnutí, musí se zajistit, aby při penetraci nedošlo ke styku chladicí kapaliny s taveninou a to tak, že tloušťka a porezita licí formy je společně s viskozitou a hustotou chladicí kapaliny sladěna tak, aby penetrace kapaliny formou zaostávala za postupem tuhnoucí fronty, viděno ze směru postupu tuhnoucí fronty. [27]

Zaostáváním penetrace docílíme toho, že chladicí kapalina nikdy nepřijde do styku s taveninou, ale vždy pouze s již ztuhlým kovem. Pokud by se kapalina dostala do styku s tekutým kovem, velmi rychlé vypařování kapaliny by způsobilo vznik bublin na povrchu odlitku a došlo by k jeho znehodnocení. [27]

Při aplikaci tohoto postupu se ukázalo, že je výhodné zahřívat ještě neponořenou část formy s taveninou, aby u relativně snadno tuhoucích tenkostěnných odlitků nedošlo ke tvorbě dalších tuhoucích front směrem od bočních stěn licí formy. V místech, kde se setkává více tuhoucích front, zpravidla vznikají vady a dochází ke snížení mechanických vlastností odlitku. [27]

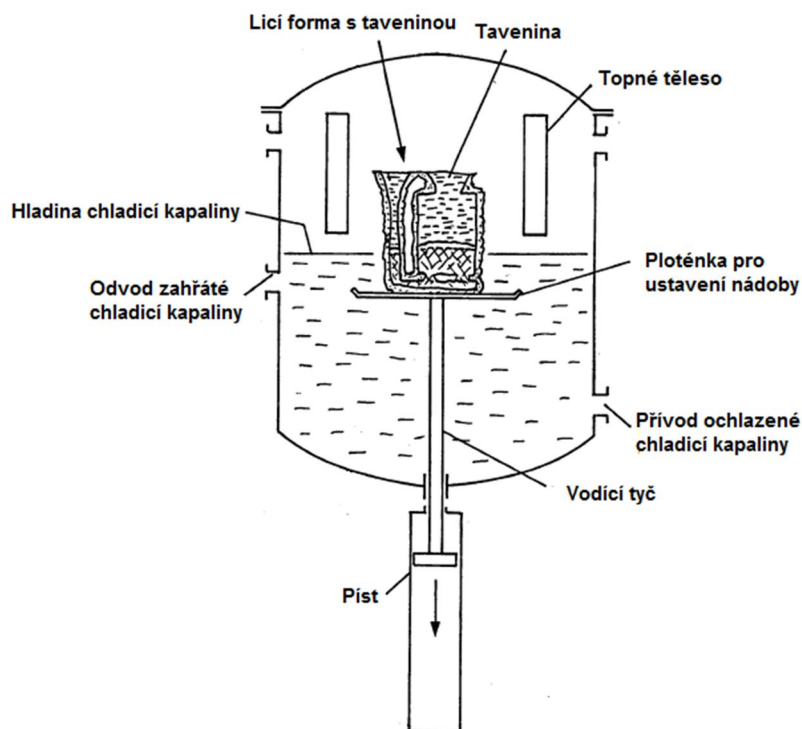
U této metody, je jedno, jestli se forma s odlitým kovem ponořuje do kapaliny, nebo se zvyšuje hladina kapaliny, která obklopuje statickou formu s taveninou.

Velikou výhodou této metody je, že při ponořování taveniny dochází k čištění odlitků a to tak, že postupující tuhnoucí fronta před sebou posouvá částice hůře rozpustných cizích látek až k volnému povrchu taveniny, kde se shromažďují v oblasti licího trychtýře a dále již nemají vliv na odlitek. [27]

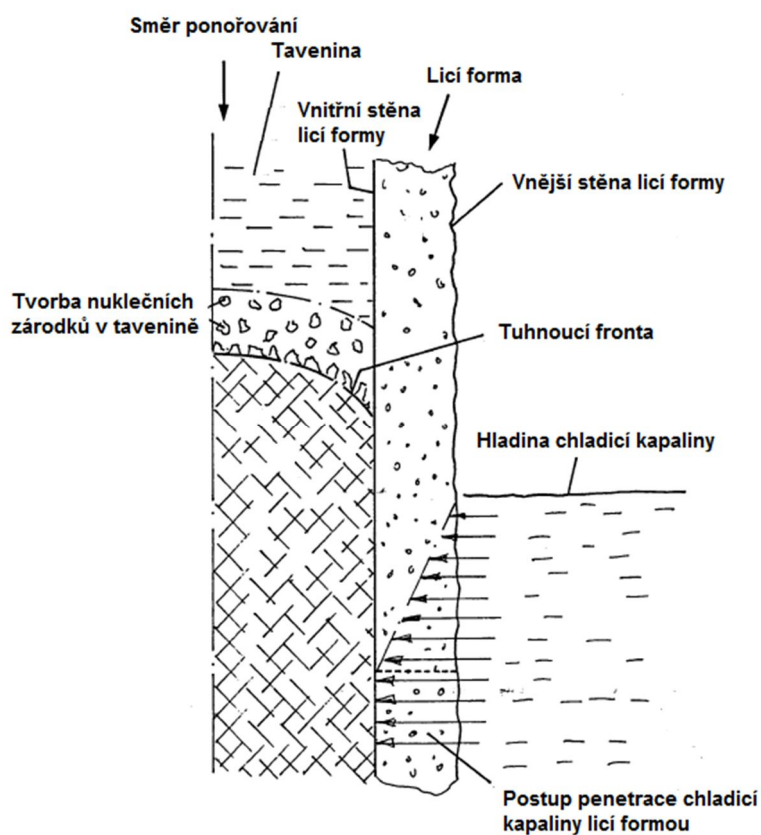
Chladicí kapalina

Jako chladicí kapalina pro tento proces je používána směs kapalin. Každá s jinou teplotou varu navržena tak, aby teplota bodu varu směsi nikdy nepřesahovala licí teplotu slitiny. Přesné složení směsi není známo. Vzhledem ke zvýšené hořlavosti se nejčastěji aplikuje postup s uzavřenou nádobou s přetlakem inertního plynu. [27]

Směs se může před použitím předehtřívát, protože některé složky nemusí být při pokojové teplotě v kapalném stavu a ponořením licí formy do chladicí kapaliny by nemuselo tuto složku dostatečně zkapalnit. [27]



Obr. 2.5.1.1 Nádoba s chladicí kapalinou, v níž dochází k ponořování formy s taveninou za současného zahřívání neponořené části formy [27]



Obr. 2.5.1.2 Schéma postupu penetrace chladicí kapaliny do formy za postupující tuhnoucí frontou [27]

Slitina	Označení Materiálu	Chemické složení v %									Materiálové Charakteristiky při 20 °C			
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be	Al	Rp0,2 MPa min.	Rm MPa min.	A5 % min.	Tvrdost HB min.
GF-ALSi7Mg0,6 A357	EN-AC-42200 DIN EN 1706	6,5 7,5	0,20	0,20	0,10	0,40 0,70	0,10	0,04 0,20	0,07	Zbytek	240	290	2	80
	AL-C-42201 EN 3125*										250	310	5	85
	WL 3.2384 Teil 3	6,5 7,5	0,20	0,20	0,10	0,40 0,70	0,10	0,04 0,20	0,07	Zbytek	240	300	4	85
	AMS-A-21180										240	300	3	85
	DAN 2000 Teil 4										240	290	2	85
											230	290	3	85
											220	280	3	85
											220	270	3	85
											220	260	2	85
	***Hero Premium Casting®	6,5 7,5	0,20	0,20	0,10	0,40 0,70	0,10	0,04 0,20	0,07	Zbytek	270	330	3	85

Tab. 2.5.1.1 Přehled materiálových charakteristik hliníkových odlitků vyráběných normálním postupem a upraveným postupem patentem HERO Premium Casting od firmy Tital [28]

2.5.2 Technologie SOPHIA

Technologie Sophia, neboli také proces Sophia, byl vyvinut firmou Zollern v Německu k dalšímu zvýšení mechanických vlastností za použití všech výhod odlévání pomocí vytavitelného modelu. Stejně jako patent HERO, nachází technologie Sophia velké uplatnění při výrobě odlitků pro letecký průmysl. [29]

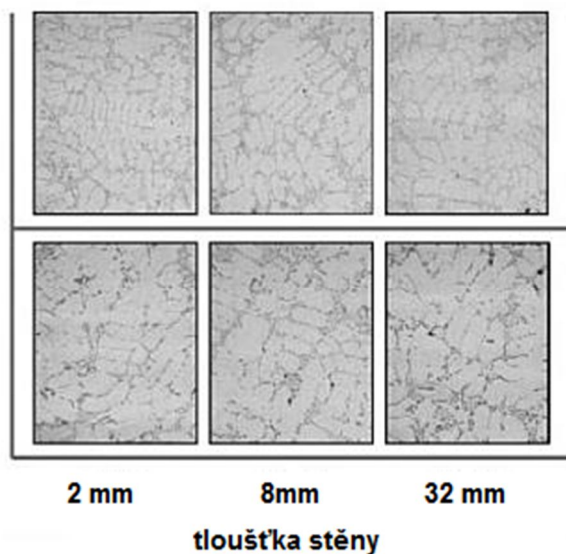
Bohužel je princip této technologie v tajnosti, a proto jsou níže popsány pouze její cíle a výhody.

Odlitky odlévané technologií Sophia dosahují mnohem větší pevnosti v tahu než odlitky odlévané ostatními tradičními metodami. [29]

Cílem této metody je dosažení co nejjemnější struktury materiálu kontrolou rychlosti tuhnutí taveniny po odlití, pro co nejlepší statické a dynamické vlastnosti. Na obrázku 2.5.2.1 můžeme vidět porovnání mikrostruktury odlitků odlévaných technologií Sophia a ostatních odlitků. Dále na obrázcích 2.5.2.2-4 můžeme vidět mechanické vlastnosti Hliníkové slitiny A357 vyrobené technologií Sophia. [29]

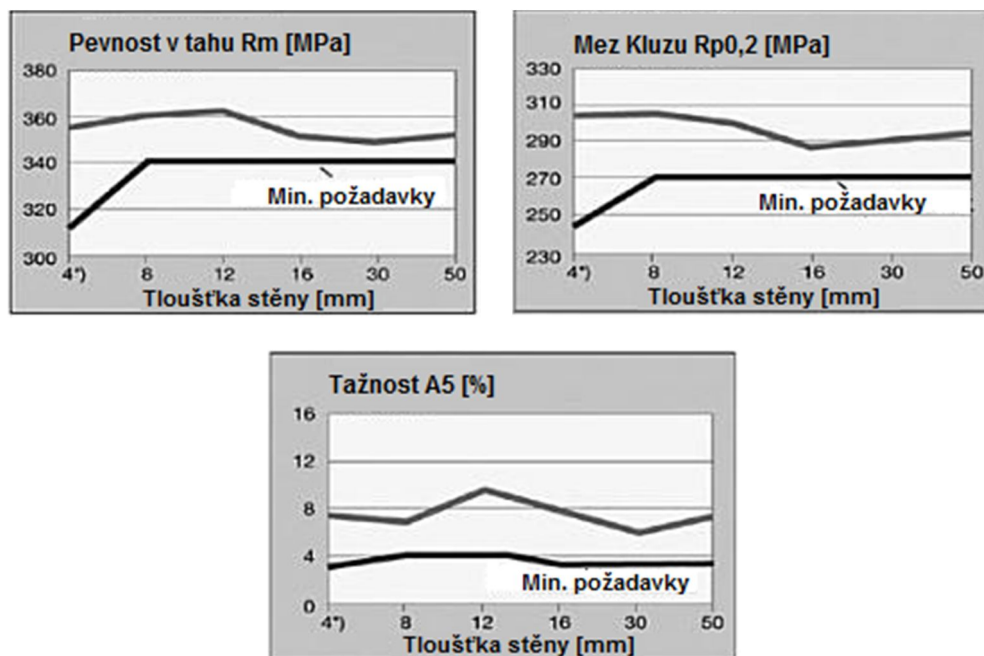
SOPHIA

**tradiční
přesné lití**



Obr. 2.5.2.1 Srovnání mikrostruktury odlitků vyrobené metodou Sophia a struktury odlitků vyrobené tradiční metodou [29]

Z obrázku lze vidět, že místa se sekundární dendritickou fází, u procesu Sophia, jsou značně menší než u ostatních technologií přesného lití, což jí zaručuje lepší mechanické vlastnosti. [29]



Obr. 2.5.2.2-4 Mechanické vlastnosti odlitku z materiálu A357 vyrobeného technologií Sophia [29]

2.6 Ukázky přesných odlitků a jejich aplikace v leteckém průmyslu



Obr. 2.6.1 Odlitky pro letecký průmysl vyráběné firmou Gürmetal v Turecku [30]



Obr 2.6.2 Odlitky vyráběné firmou Tital v Německu nacházejí velké uplatnění v leteckém a obranném průmyslu [28]

Hliníkové tenkostěnné odlitky vyrobené metodou přesného lití nacházejí velké uplatnění nejen v dopravních letadlech, ale i v letadlech vojenských, stíhacích letounech, helikoptérách a v naváděných střelách.



Obr. 2.6.3 Odléváný hliníkový rám letadla A400M [28]



Obr. 2.6.4 Hliníkový kryt kabiny stíhacího letounu Eurofighter [28]



Obr. 2.6.5 Vodící plocha lopatky dopravního letadla Airbus [28]



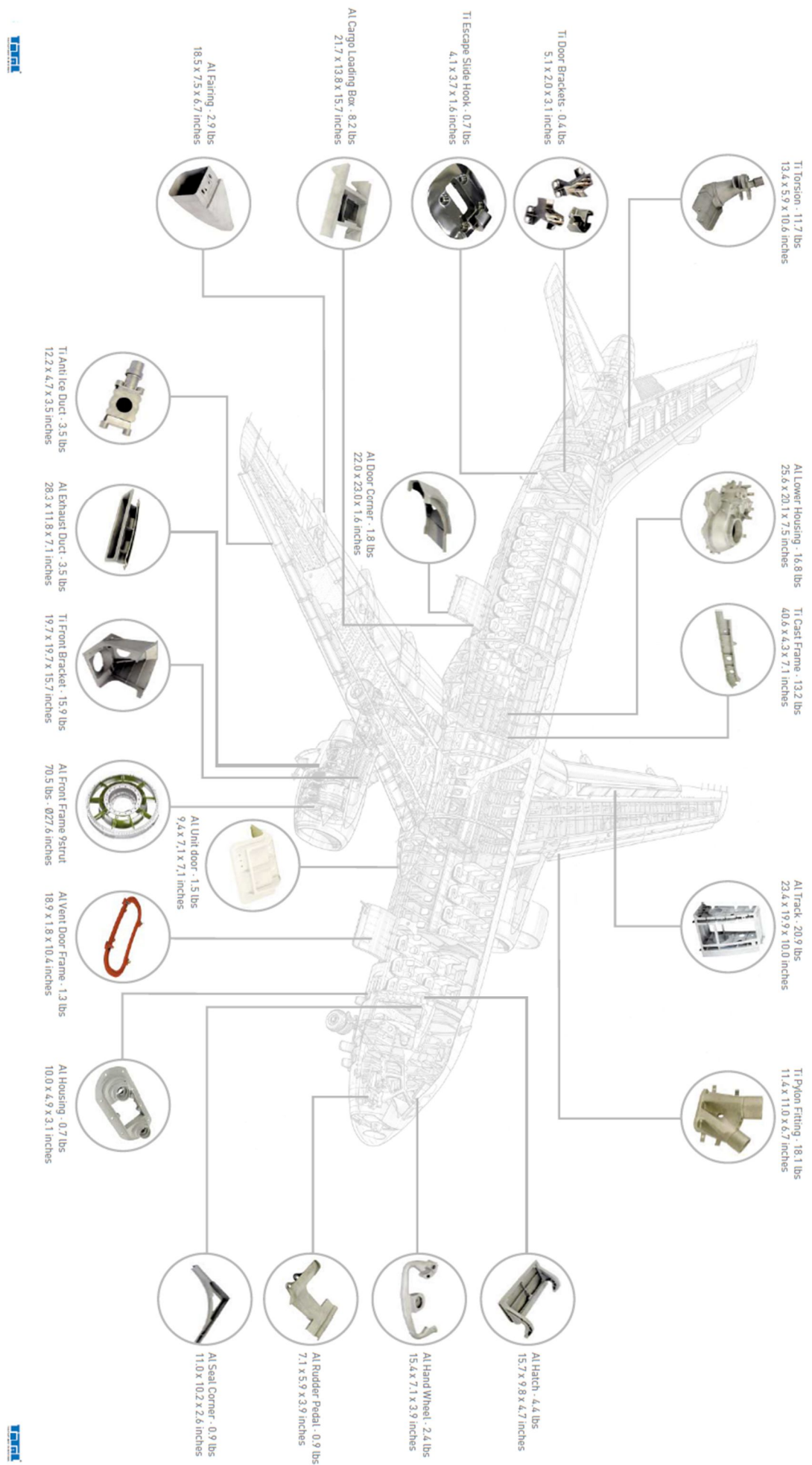
Obr. 2.6.6 Vložka turbíny proudového motoru GP7000 [28]



Obr. 2.6.7 Skříň převodovky zadního rotoru helikoptéry NH90 [28]



Obr. 2.6.8 Zadní rám řízené střely Taurus KEPD 350 [28]



Obr. 2.6.9 Přehled využití odlitků při konstrukci letadel [28]



Obr. 2.6.10 Hliníkový profil křídla dopravního letadla Airbus A320 vyrobený německou firmou Zollern [31]



Obr. 2.6.11 Odlitky vyrobené firmou Zollern s využitím technologie SOPHIA [31]

ZÁVĚR

Průmyslové nasazení technologie přesného lití metodou vytavitelného modelu nemá příliš dlouhou historii. Avšak její použití v oblasti výroby vysoce náročných odlitků dokazuje, že tato technologie je plně schopna uspokojit požadavky zákazníků z tak sofistikovaných oborů jakými bezesporu jsou letectví a kosmonautika.

Tato technologie poskytuje ve srovnání s konvenčními technologiemi lití vynikající rozměrovou přesnost a drsnost povrchu. Také je možno odlévat odlitky o širokém rozsahu hmotností od gramů až po desítky kilogramů. Její princip dovoluje v závislosti na odlévaném materiálu vzniknout stěnám odlitku o tloušťce již kolem 1 mm.

Nevýhodou této technologie je relativně pomalé tuhnutí kusu. Tento fakt, který má neblahé důsledky na mechanické vlastnosti budoucích dílců, se snaží redukovat tvůrci patentovaných technologií HERO a SOPHIA.

Celosvětově jsou přesné odlitky nejvíce žádané na trhu leteckého a obranného průmyslu, kde jsou již objednávky na několik let dopředu. Je zde tedy velký předpoklad dalšího budoucího rozvoje a růstu.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] Shelmet Precision Casting. Investment Casting Suppliers: Steel Investment Casting - Lost Wax Casting - All Popular Metal Casting Alloys [online]. © 2005-2009 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.shelmetcastings.com/investment-castings-suppliers.html>

[2] WILLIAMS, Ronald. THE BLAYSON GROUP LTD. World Investment Casting Markets Review: The 12th World Conference on Investment Casting [online]. Dallas, USA, 19.10.2008, 16 s. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.blayson.com/downloads/waxmatters12.pdf>

[3] HIRST, Richard. THE BLAYSON GROUP LTD. Review of World Investment Casting Markets: International Conference on Investment Casting [online]. Durgapur, India, leden 2010, 18 s. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml30.pdf>

[4] WILLIAMS, Ronald, Richard HIRST a Milan HORÁČEK. Přehled světové produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, 2012, roč. 2012, 9-10, s. 319-321. ISSN 0037-6825.

[5] WILLIAMS, Ronald, Richard HIRST. THE BLAYSON GROUP LTD. Review of World Investment Casting Markets: 13th World Conference on Investment Casting [online]. Kyoto, Japan, 16.4.2012, 12 s. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml37.pdf>

[6] BEELEY, Peter R. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.

[7] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. 2007, 30 s. Podklad ke studiu. ČVUT. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>

[8] Journal of materials processing technology: Developments in investment casting process - A review. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2012, roč. 212, č. 11. ISSN 0924-0136. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612001823>

[9] HORÁČEK, Milan. *LATEST TRENDS IN INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY* [online]. VUT v Brně, 2008, 65 s. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl6.pdf>

[10] SALAS, O., K. KEARNS, S. CARRERA a J.J. MOORE. Tribological behavior of candidate coatings for Al die casting dies. Surface and Coatings Technology. 2003, 2-3, s. 117-127. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897203003220?np=y>

- [11] Made-in-China.com. MOLDIE INDUSTRIAL LIMITED. [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://moldie.en.made-in-china.com/product/aMcEOZeWSDkw/China-Die-Casting-Mold.html>
- [12] Bimac: Investment Casting. [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: http://www.bimac.com/investment_castings_overview.php
- [13] Investacast. Ceramic Shell Making [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.investacast.com/ceramic_shell_making.aspx
- [14] *Slévárenství - teorie* [online]. 2008. Podklad ke studiu. ČVUT. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/teorie.htm
- [15] Quality Castings. Near Net Shaped Casting for OEMs [online]. © 2013 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.qualitycastingswi.com/precision-investment-casting-successes/Near-Net-Shaped-Casting-for-OEMs>
- [16] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. VUT v Brně, 2009, 92 s. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [17] KRACMAN, Ondřej. Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody vytavitelného modelu [online]. ČVUT v Praze, 2008, 10 s. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/S3/Kracman_Ondrej_12133.pdf
- [18] HERMAN, Aleš. *Slévání* [online]. [199-?], 15 s. Podklady ke studiu. ČVUT. [cit. 2010-05-24]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/NVPO/slev_prednasky.pdf
- [19] ČZ a.s. ČZ A.S. *Odlitky z hliníku: Ostatní technologie* [online]. © 2003 - 2012 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.czas.cz/?PageId=203&SubId=2&Detail=2>
- [20] Alucast. Výroba: Odlévané Materiály [online]. [201-?] [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.alucast.cz/vyroba.html>
- [21] Key to Metals: The World's Most Comprehensive Metals Database. Modification and Refinement of Aluminum-Silicon Alloys [databáze online]. © 1999-2010 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/Article85.htm>
- [22] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [23] SubsTech. KOPELIOVICH, Dmitri. Degassing treatment of molten aluminum alloys [online]. 28.7.2012 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=degassing_treatment_of_molten_aluminum_alloys

- [24] Pyrotek: Metaullics. STAR™ 2000, 3000 Series Degassing System [online]. [200-?] [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.pyrotek.info/listings.php?id=244#>
- [25] Key to metals: The World's Most Comprehensive Metal Database. Precipitation Hardening of Aluminum Alloys [databáze online]. 2010 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=235>
- [26] Precipitace [online]. © 2005, 19 s. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Precipitace09_10.pdf
- [27] FOLKERS, Klaus, Hans-Peter NICOLAI, Helmut RODEHÜSER, Ulrich STEINRÜCKEN a Dietmar HENNEKE. TITAN-ALUMINIUM-FEINGUSS GMBH. Hero Premium Casting® [patent]. Bestwig, Německo. EP 0571703 B1. Uděleno 13.01.1993. Zapsáno 01.12.1993. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=E&date=19961113&CC=EP&NR=0571703&KC=B1
- [28] TITAL. Brochure Tital [online]. Bestwig, Germany, [200-?], 13 s. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.tital.de/cms/upload/downloads/Imageflyer-GB.pdf>
- [29] SOETENS, Frans. New frontiers in light metals: proceedings of the 11th International Aluminium Conference INALCO 2010. Washington, D.C.: IOS Press, © 2010, 528 s. ISBN 978-1-60750-586-0. Dostupné z: http://books.google.cz/books?id=-63K4dxD-dUC&dq=sophia+process+casting&hl=cs&source=gbp_navlinks_s
- [30] Gürmetal: Investment Casting. GÜRMETAL. Products: Aerospace [online]. © 2010 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.gurmetal.com.tr/EN/products.html>
- [31] ZOLLERN GMBH & CO.KG. Brochure Zollern [online]. © 2013, 12 s. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.zollern.de/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting_and_Forging/Zollern_AFS_Prospekt.pdf