



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE Z POHLEDU
ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI ODLITKŮ**

FOUNDRY TECHNOLOGIES FROM THE POINT OF VIEW OF CASTINGS
ACCURACY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Hýbal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ondřej Hýbal**
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.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Slévárenské technologie z pohledu rozměrové přesnosti odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Srovnání různých technologií zhotovení odlitků z hlediska dosažení jejich maximální rozměrové přesnosti

Cíle bakalářské práce:

Literární přehled slévárenských technologií z hlediska dosažení nejmenších rozměrových tolerancí konečných odlitků

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. (2006): Capabilities of Investment Casting Technology, Livarski Vestnik, Vol.54, 4 pp. 175-186

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

Horáček, M. (1997): Accuracy of castings manufactured by the lost wax process, Foundry Trade Journal 3535, October, p.424 - 429

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

Tato bakalářská práce pojednává o různých slévárenských technologiích, konkrétně o technologii vytavitelného modelu, vypařitelného modelu a tlakového lití. Tyto technologie srovnává nejen na základě dosažení nejmenších rozměrových tolerancí konečných odlitků, ale také z hlediska jiných faktorů jako například dosažitelná drsnost povrchu, tloušťka stěny, ekonomika výroby a další. Dále tato práce popisuje přesnost odlitků obecně a také informuje o strategii řízení kvality Six Sigma.

Klíčová slova

Přesnost odlitků, vytavitelný model, vypařitelný model, lost foam, full mould, tlakové lití, rozměrové změny, Six Sigma.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with various casting technologies, specifically about investment casting technology, evaporative-pattern casting and die casting. These technologies compares not only on achieving the smallest dimensional tolerances of the final casts, but also of other factors such as surface roughness, wall thickness and production economics. This thesis also describes casting accuracy in general and informs about the management strategy of Six Sigma.

Key words

Casting accuracy, investment casting, evaporative-pattern casting, lost foam, full mould, die casting, dimensional changes, Six Sigma.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÝBAL, O. *Slévárenské technologie z pohledu rozměrové přesnosti odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 38 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Slévárenské technologie z pohledu rozměrové přesnosti odlitek* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu na konci této práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....
Ondřej Hýbal

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanovi Horáčkovi, CSc. za rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 PŘENOST ODLITKŮ.....	9
2 METODOLOGIE SIX SIGMA.....	11
2.1 Co to je Six Sigma a její historie.....	11
2.2 Cíle a přínosy	11
2.3 Hodnoty sigma	11
2.4 Implementace Six Sigma.....	13
3 VYTAVITELNÝ MODEL	14
3.1 Princip	15
3.2 Přesnost a parametry technologie vytavitelného modelu.....	19
3.3 Rozměrové změny v průběhu technologie.....	20
3.3.1 Zhotovení voskového modelu.....	20
3.3.2 Zhotovení keramické formy.....	20
3.3.3 Chladnutí a tuhnutí kovu.....	21
4 VYPAŘITELNÝ (SPALITELNÝ) MODEL	23
4.1 Princip	24
4.2 Lost foam	27
4.3 Full mould	28
4.4 Spalitelný model.....	28
4.5 Parametry technologie vypařitelného modelu.....	28
5 TLAKOVÉ (VYSOKOTLAKÉ) LITÍ.....	29
5.1 Princip	29
5.1.1 Stojce s teplou lící komorou	30
5.1.2 Stroje se studenou lící komorou.....	31
5.2 Parametry technologie vysokotlakého lití	31
6 NÍZKOTLAKÉ LITÍ	32
6.1 Princip	32
6.2 Parametry technologie nízkotlakého lití.....	32
SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY	35
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	38
SEZNAM TABULEK	38

ÚVOD

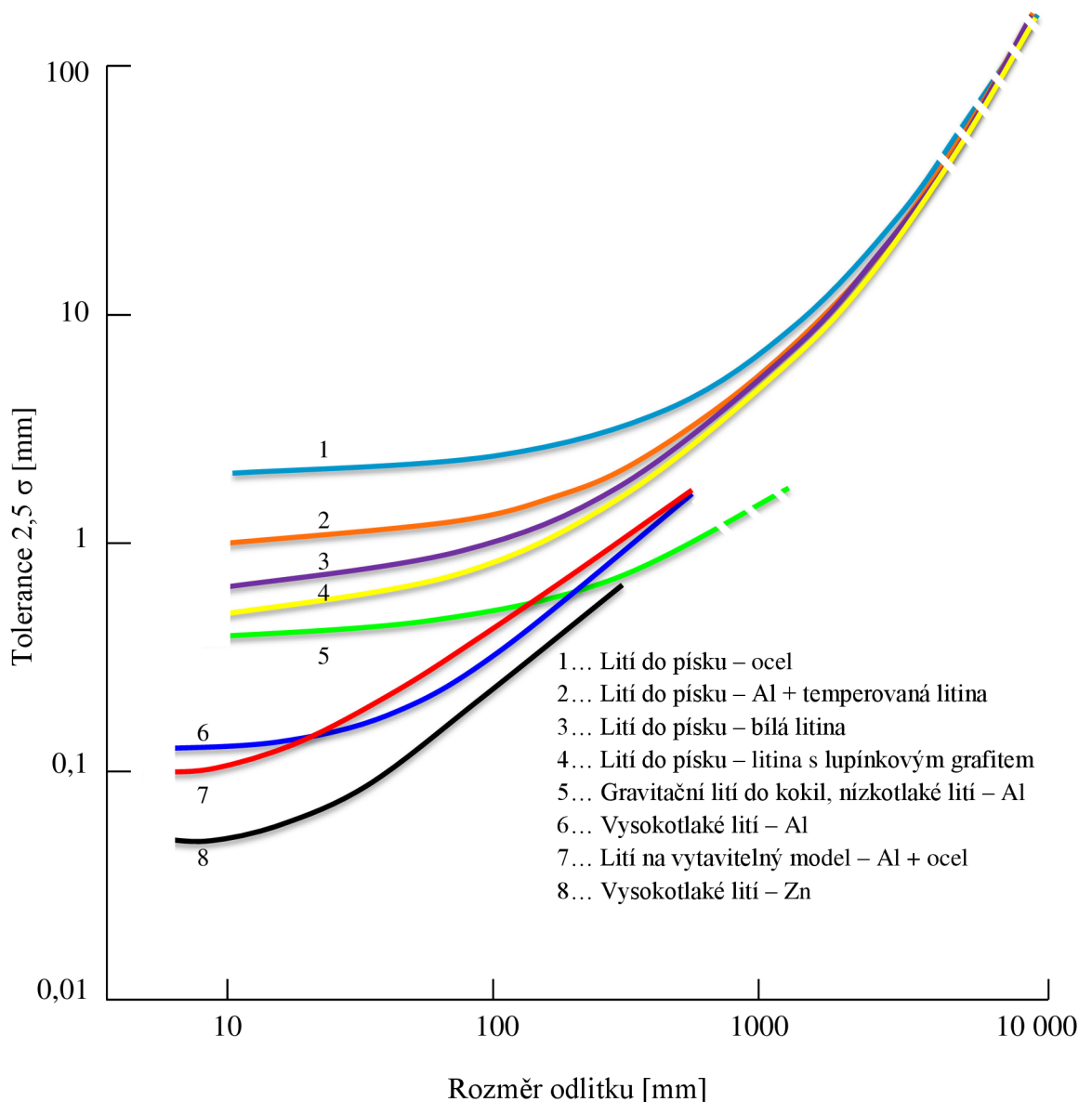
Technologií zhotovení odlitku existuje v současné době nepřeberné množství. Jsou to například technologie lití do pískových forem, do kovových forem, které se nazývají kokily, lití na vypařitelný nebo spalitelný model, který je zhotoven z polystyrenu anebo lití na vytavitelný voskový model. V dnešní době se roztavený kov odlévá buďto gravitačním způsobem, avšak existují i metody, při kterých se používá zvýšených sil, což jsou technologie tlakového a odstředivého lití. Odlévané materiály jsou také rozdílné a je jich celá škála od slitin železa (oceli, litiny) přes slitiny jiných kovů (např. hliník, zinek, hořčík, atd.) až po superslitiny. Proces odlévání se provádí nejenom při atmosférickém tlaku, ale také může probíhat ve vakuu. Každá z těchto technologií je specifická a jsou odlišné, avšak jedno mají společné, a to je, že ani jednou z těchto technologií nelze dosáhnout 100% rozměrové přesnosti finálního odlitku. Vždy se konečný rozměr každého jednoho odlitku pohybuje v tolerančním poli, které splňuje nebo také nemusí splňovat požadavky zákazníka.

Současná situace si vyžaduje vyrábět odlitky velmi složitých tvarů s co nejmenším počtem zmetkových výrobků v co nejmenších rozměrových tolerancích. Dále je kladen důraz na rychlost zhotovení odlitku a v neposlední řadě také na jeho cenu. Net-shape technologie se vyznačují výrobou odlitků, které splňují jak rozměrové tolerance, tak drsnost povrchu, bez nutnosti dalších operací jako například obrábění.

Ačkoliv jde vývoj kupředu, stále není možné vyrobit dva odlitky naprosto totožné a ta slévárna, která dovede vyrobit nejpřesnější odlitky v co nejkratším čase a za co nejnižší cenu, bude vždy upřednostňována před konkurencí.

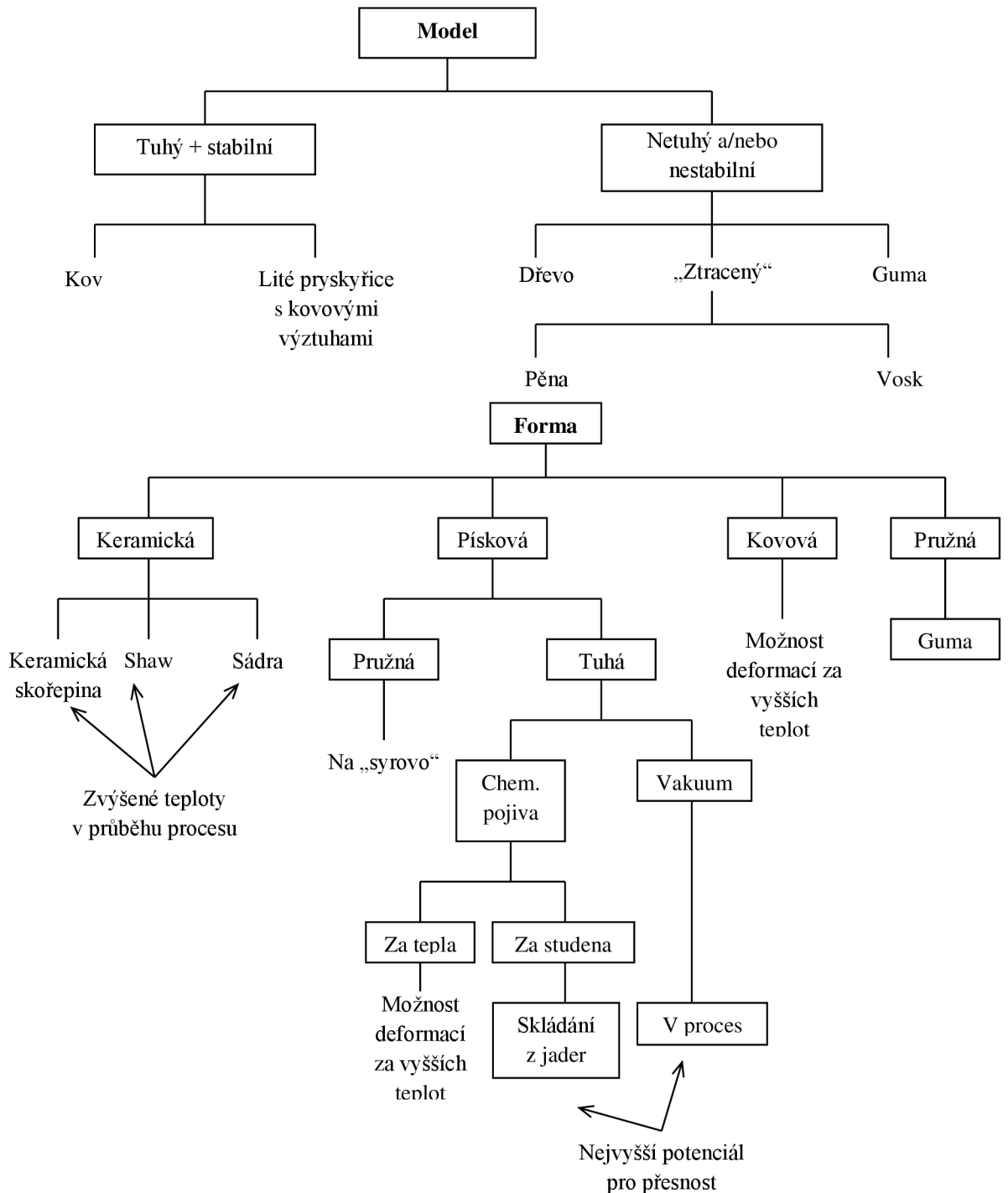
1 PŘENOST ODLITKŮ [1, 2, 3]

Přesnost odlitku neboli jeho dokonalost je dána tolerancemi rozměrovými, co se do velikosti odlitku týče, tolerancemi tvarovými (geometrickými) a drsností povrchu odlitku. Obecně platí, že nepřesnosti odlitků rostou se vzrůstajícím jmenovitým rozměrem (viz obr. 1), což znamená, že porovnání metod výroby odlitků z hlediska jejich dosahované rozměrové přesnosti musí být vztaženo k určitému jmenovitému rozměru.



Obr. 1 Průměrné hodnoty rozměrových tolerancí u různých slévárenských technologií [2]

Od výroby modelu až po konečný odlitek vstupuje do procesu spousta faktorů ovlivňujících výslednou rozměrovou přesnost výrobku. Zhodnocením těchto faktorů a optimalizací výrobního procesu se dá docílit co nejpřesnějších rozměrů s nejmenšími tolerancemi a eliminovat zmetkovitost finálních odlitků. Jedním ze základních požadavků z hlediska dosažitelné přesnosti odlitku je přesný tuhý model a přesná tuhá forma. Formy a modely z hlediska jejich potenciálu k dosažení určité rozměrové přesnosti jsou uvedeny na obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení forem a modelů podle jejich potenciálu k dosažení rozměrové přesnosti [2]

2 METODOLOGIE SIX SIGMA [4, 5, 6, 7]

Jakost odlitků, stejně jako jejich rozměrová přesnost je důležitým faktorem pro samotné slévárny, jelikož má velký vliv na spokojenost zákazníků. Spokojený zákazník je prioritou a hlavním cílem pro všechny slévárny v dnešní době, a proto je velmi důležité produkovat co nejkvalitnější odlitky za co nejmenší cenu, jelikož nároky zákazníků jsou stále větší. K tomu nám slouží různé metody neboli strategie řízení. Jednou z těchto strategií je Six Sigma.

2.1 Co to je Six Sigma a její historie

Six Sigma je strategie řízení, jinými slovy sada technik a nástrojů pro neustálé průběžné zlepšování procesu nejen výroby, ale také třeba služeb. Tento koncept byl zaveden ve společnosti Motorola, konkrétně Billem Smithem, v roce 1986. Později byla tato metoda dále zpracována společnostmi General Electric nebo Honeywell. Dnes se používá v různých odvětvích průmyslu. Six Sigma posuzuje kvalitu na základě statistických metod s naměřenými směrodatnými odchylkami. Kvalitu posuzuje nikoliv na základě výrobků, ale výrobního procesu jako celku. Proces Six Sigma poskytuje společnostem způsob, jak dělat méně chyb ve všech svých činnostech, a to eliminováním neshod dříve, než se objeví.

2.2 Cíle a přínosy

- a) maximalizace zisku
- b) minimalizace časové náročnosti výroby
- c) efektivní využívání zdrojů
- d) zvyšování produktivity
- e) minimalizace defektů, neshod, reklamací a nákladů
- f) redukce dalších operací

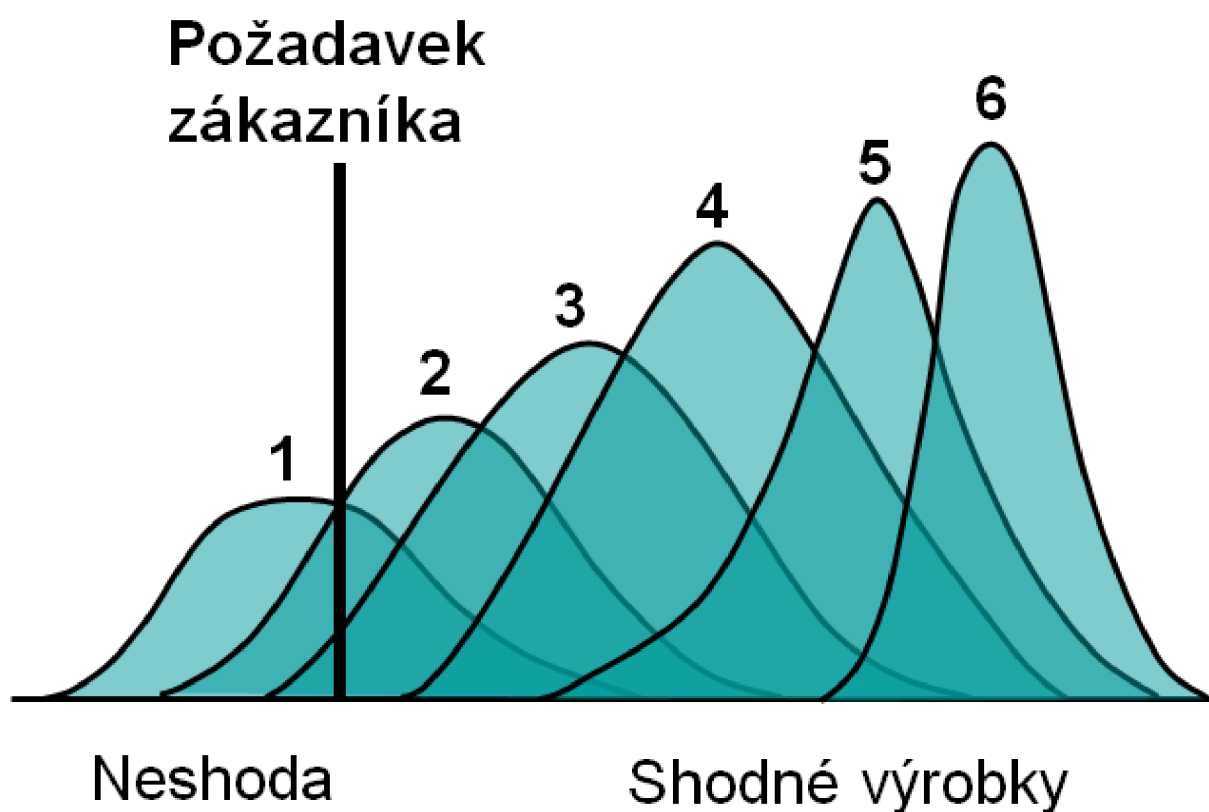
2.3 Hodnoty sigma

Písmeno řecké abecedy sigma se používá ve statistice k označení směrodatné odchylky. Směrodatná odchylka vypovídá o tom, jak se od sebe odlišují hodnoty z daného souboru. Čím je směrodatná odchylka menší, tím jsou jednotlivé hodnoty v souboru navzájem podobnější a naopak.

Úrovně sigma zobrazují v grafu Gaussova rozdělení to, s jakou pravděpodobností se v procesu vyskytuje chyba. Vyšší úroveň sigma znamená, že k chybě, tudíž nesplnění požadavku zákazníka, dochází s menší pravděpodobností. Úroveň sigma reprezentuje počet DPMO (Defects per million opportunities), tedy počet chyb z milionu možných. Úroveň kvality 6 sigma představuje zhruba 3,4 závady na jeden milion příležitostí udělat chybu. Hodnoty sigma a procenta neshodných výrobků jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Efektivita výroby v závislosti na dosažení určité úrovně sigma [4]

Sigma	DPMO	Efektivita	Zmetkovitost
1	691 462	31 %	69 %
2	308 538	69 %	31 %
3	66 807	96,3 %	6,7 %
4	6 210	99,38 %	0,62 %
5	233	99,977 %	0,023 %
6	3,4	99,99966 %	0,00034 %
7	0,019	99,999981 %	0,0000019 %

**Obr. 3** Porovnání různých úrovní sigma [8]

2.4 Implementace Six Sigma

Zlepšení výrobního procesu strategií Six Sigma probíhá v pěti standartních krocích dle metodiky DMAIC. Všechny kroky této metodiky jsou nutné k docílení co nejmenší výroby zmetků a vždy se postupuje v přesně daném pořadí. Jednotlivá písmena znamenají:

D – Define (definice)

M – Measure (měření)

A – Analyze (analýza)

I – Improve (zlepšení)

C – Control (řízení)

a) Definice

Účelem tohoto kroku je získat informace o procesu, který má být vylepšen, definovat si cíle a stav, kterého má být dosaženo a vytvoří se tým pracovníků, kteří budou pracovat na vylepšení procesu. Nastaví se plán činností, jež jsou třeba k eliminaci problému. Zkrátka se vymezí co, proč, kdo a jak moc a do kdy bude zlepšováno.

b) Měření

Cílem této fáze je sběr a vyhodnocování informací o současné situaci a postupu k naplnění definovaných cílů. Doložení plnění stanovených cílů je možné pouze na základě předem definovaných měřitelných ukazatelů.

c) Analýza

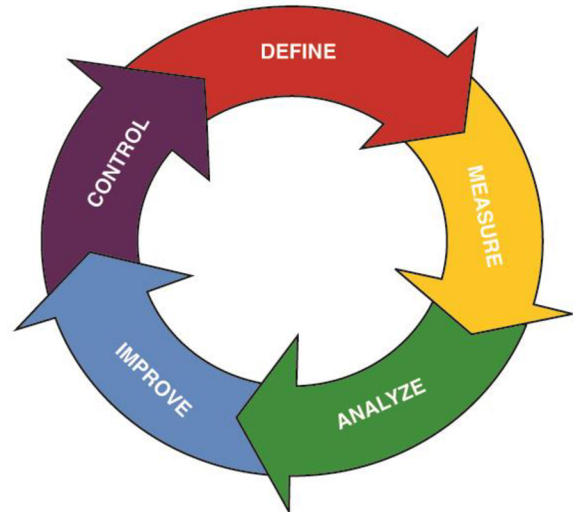
Ve třetím kroku této metodiky se analyzují klíčové příčiny a nedostatky, jež mají významný vliv na výskyt neshod a výrobu zmetkových výrobků.

d) Zlepšení

Základním cílem je odstranění příčiny problému. Toho se docílí nastavením nových parametrů procesu a jeho optimalizací. Součástí by mělo být také minimalizování nákladů a maximalizování přínosů pro zákazníka. V této fázi se vytváří a implementují řešení, která mají odstranit hlavní příčiny vzniku vad.

e) Řízení

Pokud je problém úspěšně vyřešen nebo alespoň je dosaženo výrazného zlepšení, je třeba udělat závěrečný krok a tím je zavedení změn do celého systému. Vhodné je stanovit období, ve kterém se sledují dosažené výsledky a také například zisk z nového vylepšení. Cílem fáze řízení je zabezpečit trvalé udržení zlepšeného stavu.



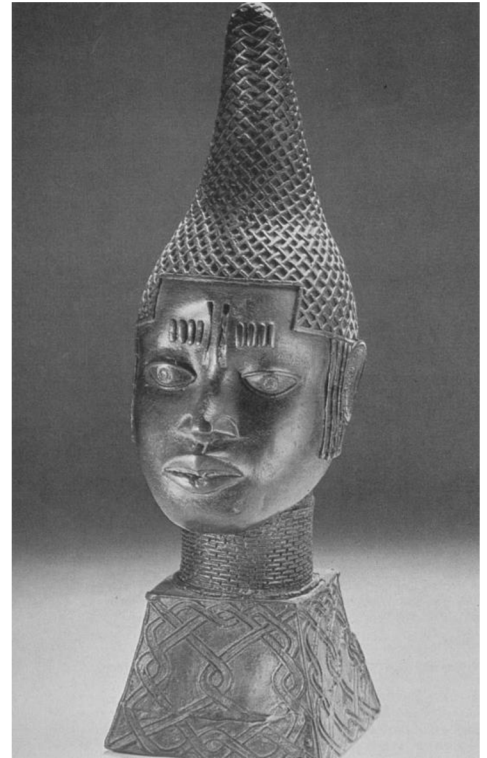
Obr. 4 Metodika DMAIC [9]

3 VYTAVITELNÝ MODEL [1, 3, 10, 11, 12]

Z historického pohledu jde o nejstarší technologii odlévání na světě datovanou už od roku 5000 př. n. l. V těchto dávných dobách se metoda lití na vytavitelný voskový model používala především k odlévání uměleckých předmětů. Později došlo k zapomnění této technologie a teprve v průběhu druhé světové války došlo k obnovení technologie lití na vytavitelný voskový model, kdy se tak odlévaly součásti pro zbrojní průmysl.



Obr. 5 Bronzová figura tanečnice
(Indie ~ 3000 př. n. l.) [1]



Obr. 6 Bronzová hlava
(Benin – 12. stol. n. l.) [1]

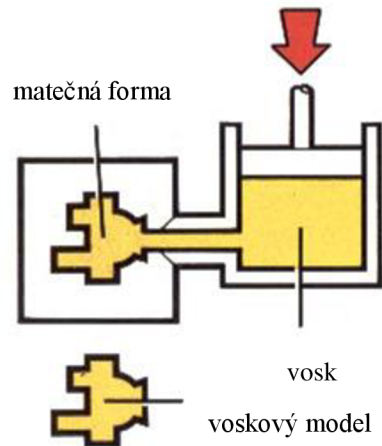
Metoda vytavitelného modelu („na ztracený vosk“ nebo také „přesné lití“) se řadí mezi technologie near-net-shape („téměř na hotovo“), tzn. výroba přesných odlitků bez nutnosti dalších dokončovacích operací. Touto technologií lze dosáhnout velmi složitého tvaru odlitku s úzkými rozměrovými tolerancemi a s velmi dobrou jakostí povrchu. V porovnání s technologií tlakového lití mají odlitky lepší mechanické vlastnosti a toho se využívá u odlitků pro letecký průmysl, kde musí být splněny nejpřísnější normy. Technologií lití na ztracený vosk lze dosáhnout velmi efektivního a ekonomicky výhodného řešení výroby finální součásti.

Technologie lití na voskový model nabízí možnost odlévat téměř všechny materiály, což je velká výhoda u obtížně obrobitelných materiálů jako je například titan a jeho slitiny, kde je výroba součásti jinou technologií mimořádně nákladná nebo dokonce zcela nemožná.

3.1 Princip

a) Výroba modelu

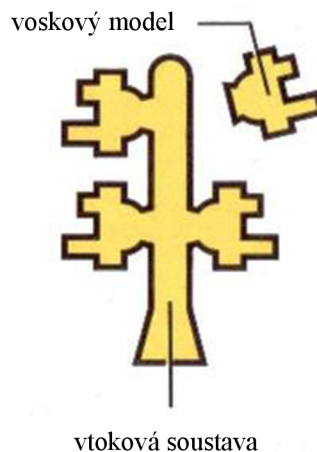
Základním stavebním kamenem této metody je model vyrobený z voskové směsi. Tento model může být zhotoven gravitačním litím nebo tlakovým vstříknutím vosku do tzv. matečné formy, která udává voskovému modelu tvar a rozměry. Matečné formy jsou převážně kovové a jsou vyráběny obráběním, odléváním, galvanoskopicky nebo metalizováním. Další technologií, kterou lze zhotovit voskový model je 3D tisk. Na kvalitě modelu podstatnou měrou závisí kvalita hotového odlitku.



Obr. 7 Výroba modelu [1]

b) Sestavování do stromečků

Další fází této technologie, která nastává po vyzrání (stabilizaci) vosku, je sestavování voskových modelů do tzv. stromečků, které se skládají z vtokové soustavy a několika modelů. Modely se ke vtokové soustavě buďto přilepí nebo připájí. Vtoková soustava bývá vyrobena na rozdíl od modelů z méně kvalitního regenerovaného vosku. Nová vosková směs se nazývá panenská.



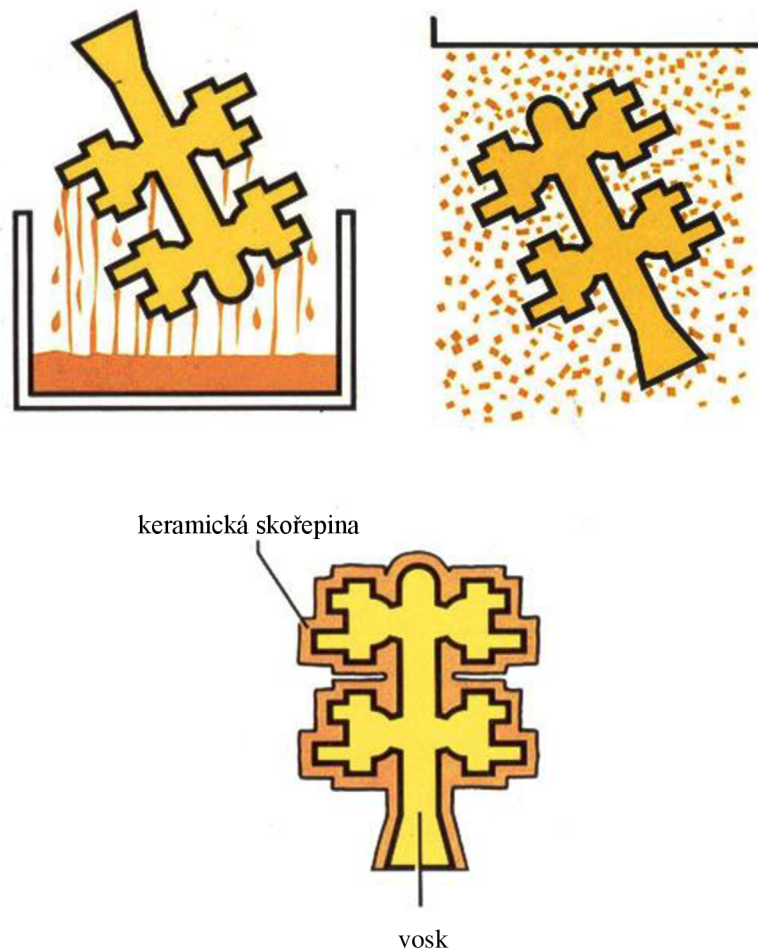
Obr. 8 Sestavování stromečku [1]

c) Výroba skořepinové formy

Výroba keramické skořepiny spočívá v tom, že nejprve je voskový stromček ponořen do obalové keramické břečky tím způsobem, aby bylo zajištěno, že se keramická břečka dostane do všech záhybů a rovnoměrně pokryje celý povrch modelu. Keramická břečka sestává z pojiva a plniva. Pojivo zajišťuje pevnost samotné formy po vysušení a vyžihání. Plnivo je žáruvzdorný materiál (nejčastěji křemenná moučka).

Dalším krokem je okapání keramické břečky a následný posyp stroměčku žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti. Na první vrstvy se zpravidla používá jemnější posypový materiál a na další vrstvy pak hrubší. Keramické ostřívo se nanáší buďto sprchovým posypem (proudem volně padajícího materiálu) anebo fluidním způsobem (nanášení vzduchem načeřeného posypového materiálu).

Poté se jednotlivé vrstvy obalu suší proudícím vzduchem nebo působením plynného činidla (čpavku) v klimatizovaném prostoru při nízké vlhkosti okolního vzduchu a při stálé teplotě. Stálá teplota je nezbytnou součástí při sušení vzhledem k faktu, že voskové směsi a keramický materiál mají rozdílnou tepelnou roztažnost a při větším nárůstu teploty by došlo k porušení keramické formy. Tyto první tři kroky (máčení, posypání, sušení) se opakují do té doby, než je dosaženo optimální tloušťky skořepinové formy.



Obr. 9 Výroba skořepinové formy [1]

d) Vytavování voskové hmoty

Po dokonalém vysušení poslední vrstvy obalu následuje vytavení voskového modelu a tedy vznik dutiny pro odlévání kovový materiál. Pro natavení voskové hmoty dostačují teploty v rozmezí 60 – 90 °C. Takto nízké teploty jsou pro vytavování nevhodné z hlediska rovnoměrného ohřevu celého modelu. Při rovnoměrném ohřevu by vlivem velké tepelné roztažnosti vosku a malé tepelné roztažnosti keramiky došlo k popraskání skořepiny. Vytavování se provádí tzv. tepelným šokem, kdy se rychlým ohřevem skořepiny nataví vrstva vosku a vznikne tak dilatační spára, tj. vrstva tekutého vosku na hranici skořepina – voskový model. Tato dilatační spára umožňuje modelu volně dilatovat, což zabrání popraskání skořepiny.



Obr. 10 Vytavování vosku [1]

Vytavování modelové hmoty se provádí:

- Za vysoké teploty (min. 750°C s následným žiháním skořepiny při 900 – 1000°C)
- Za nízké teploty (vroucí vodou, mikrovlnným ohřevem, horkým vzduchem, v autoklávu (párou) – nejpoužívanější metoda)

e) Žihání skořepinové formy a odlévání

Před samotným odléváním se musí keramické formy vyžít. Žihání skořepiny slouží k převedení amorfní formy vazné vrstvičky SiO_2 na krystalickou formu, což zapříčiní dosažení požadované tvrdosti a pevnosti skořepiny, a současně dojde k odstranění všech nežádoucích látek jako je voda a zbytek nevytaveného vosku. Žihací teploty se pohybují v rozmezí 900 – 1400 °C v závislosti na použitém materiálu skořepiny (křemenný písek, molochit, korund aj.). Žihání probíhá těsně před odléváním, aby se kov odléval do předehřátých skořepin a nedocházelo tak k jejich praskání vlivem teplotního šoku.

Ihned po žihání (v případě lití do žhavých forem) skořepinové formy následuje odlévání, které se provádí buďto na vzduchu nebo probíhá ve vakuu. V případě lití do studených forem se odlévá do skořepiny o pokojové teplotě. Tato metoda však nelze použít u křemenných forem pro nebezpečí jejich popraskání.



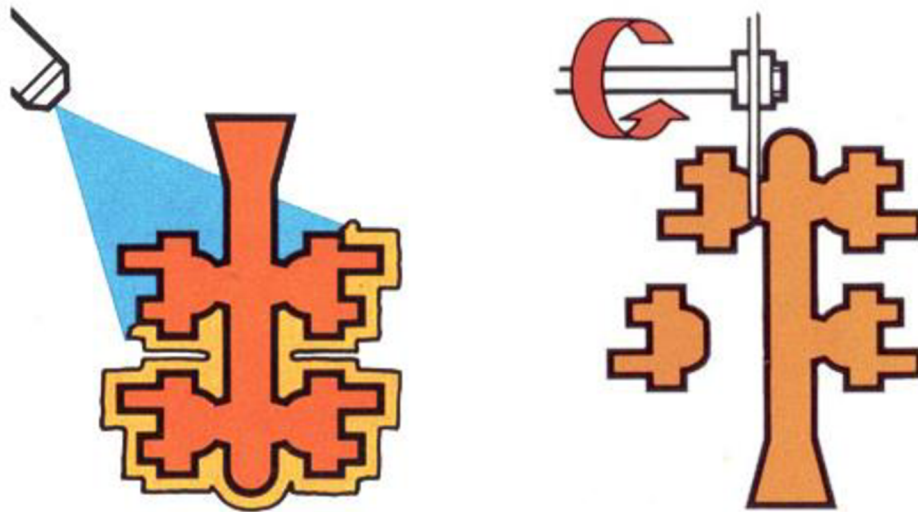
Obr. 11 Lití kovu [1]

f) Dokončovací operace

Po ztuhnutí a vychladnutí kovu je třeba nejprve odstranit skořepinu. To se dělá buďto vibracemi, to je však velmi hlučné a také prašnost je nevýhodou této metody, proto se odstranění skořepiny vibračním způsobem provádí ve zvukotěsné kabině. Druhou metodou pro odstranění skořepiny je tryskání ocelovými broky. Tryskání ocelovými broky má však negativní vliv na kvalitu povrchu odlitku. Další metodou je ostříkávání vysokotlakým proudem vody. Touto metodou lze odstranit zbytky skořepiny i ze špatně dostupných míst. Zbytky skořepiny lze odstranit také chemickou cestou, to je však velmi finančně náročné.

Poté je nutné odřezat jednotlivé odlitky, zabrousit zbytky vtokové soustavy, případně odstranit povrchové vady, aby finální odlitek splňoval všechny požadavky na kvalitu danou zákazníkem.

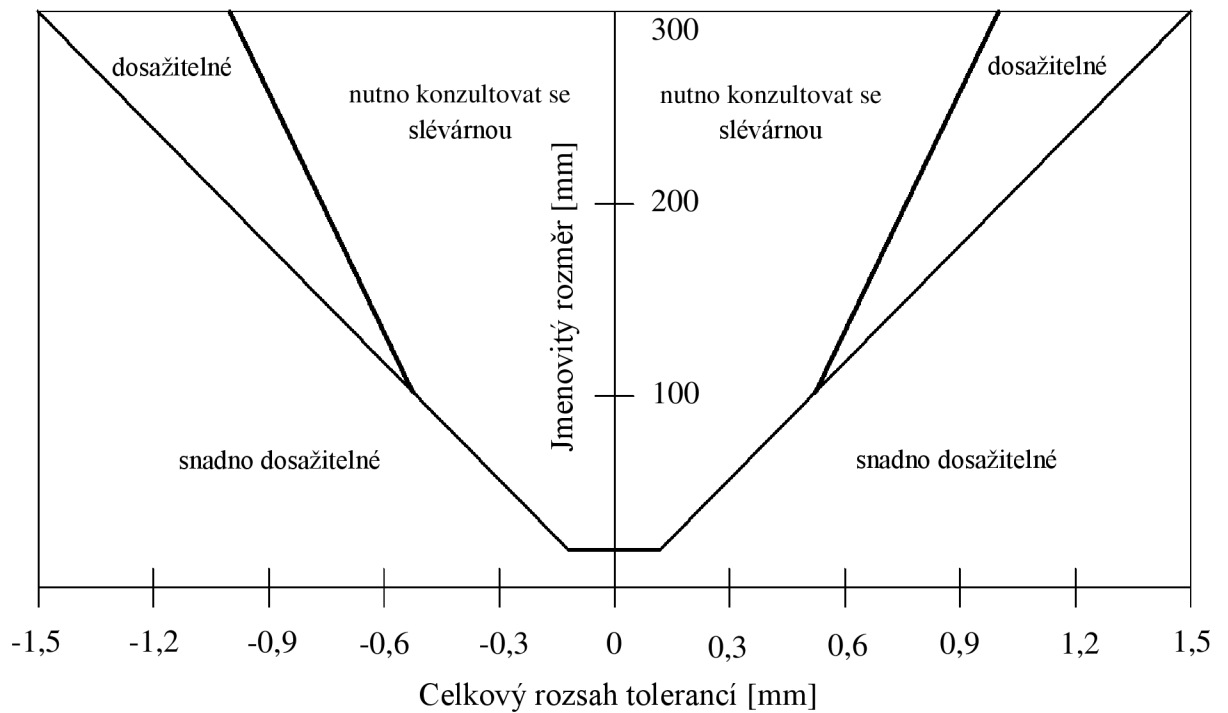
U některých případech se odlitek dále obrábí nebo tepelně zpracovává.



Obr. 12 Odstranění skořepiny a odřezání odlitků [1]

3.2 Přesnost a parametry technologie vytavitelného modelu

Technologie vytavitelného modelu (metoda přesného lití) patří mezi metody zhotovení odlitek s velmi úzkými rozměrovými tolerancemi. Jak bylo zmíněno výše, tato technologie se řadí mezi near-net-shape technologie, což znamená, že součást je vyrobena na hotovo pouze odléváním bez nutnosti dalšího obrábění. Tolerance, kterých lze touto metodou dosáhnout jsou uvedeny na obr. 13.



Obr. 13 Dosažitelné tolerance v závislosti na jmenovitém rozměru [1]

Tab. 2 Přehled parametrů dosahovaných metodou vytavitelného modelu [13]

Metoda lití	Rozměry [mm]	Tolerance IT	Hmotnost [kg]	Tloušťka stěny [mm]	Drsnost Ra [μm]
Vytavitelný model	5 až $2 \cdot 10^3$	10	10^{-3} až 10^2	0,2 až 20	1,6 až 25

3.3 Rozměrové změny v průběhu technologie

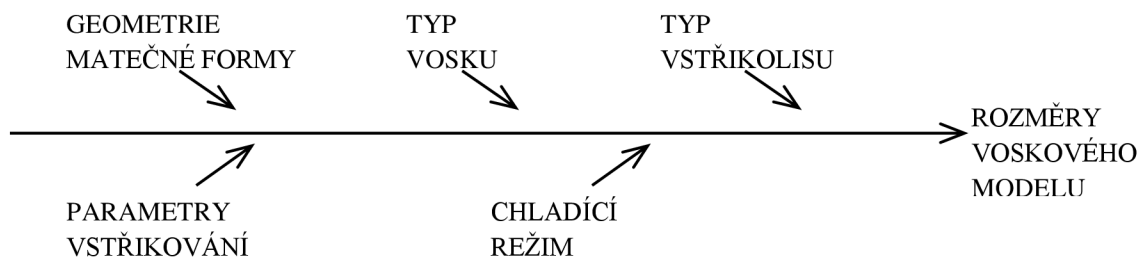
Aby bylo možné dosáhnout úzkých rozměrových tolerancí při technologii vytavitelného modelu, je nezbytné znát chování materiálů použitých v průběhu celého technologického toku. Znalost rozměrových změn voskového modelu musí být doplněna znalostí chování keramického materiálu v průběhu výroby skořepiny. To znamená při obalování, vytavování vosku, schnutí a žihání skořepiny. Nutná je také znalost dějů po nalití tekutého kovu (odolnost formy vůči tlaku tekutého kovu a v průběhu tuhnutí, objemové změny odlité slitiny v průběhu tuhnutí). Všechny rozměrové změny je potřeba posuzovat v prostoru, protože rozměrové změny (smrštění/roztahání) šířky, délky a tloušťky jsou jiné. Takové množství parametrů ovlivňujících konečný odlitek vypovídá o tom, že dosažení úzkých rozměrových tolerancí není u metody vytavitelného modelu vůbec jednoduché. Rozměrové změny, ke kterým dochází v průběhu metody vytavitelného modelu, jsou na obr. 14.

Tři základní fáze, při kterých dochází k rozměrovým změnám:

- a) Fáze zhotovení voskového modelu
- b) Fáze výroby keramické formy
- c) Fáze chladnutí a tuhnutí odlitého kovu

3.3.1 Zhotovení voskového modelu

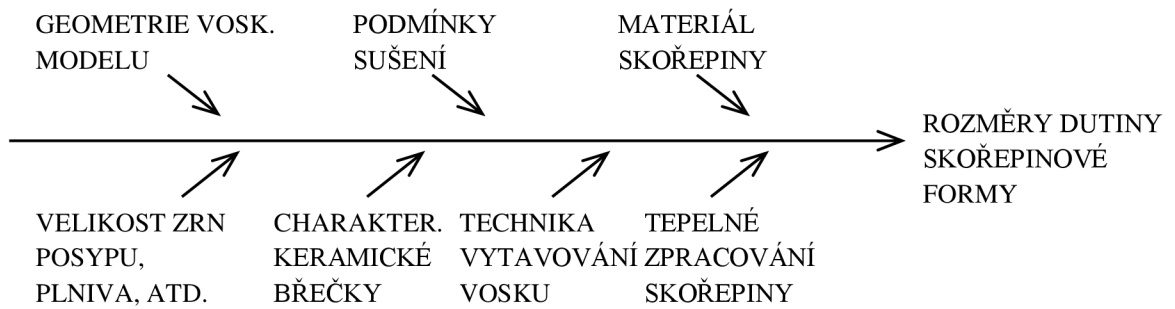
Dosažitelná přesnost matečné formy závisí na technologii jejího zhotovení. Přesnost a konečné rozměry voskového modelu jsou ovlivněny převážně parametry vstřikování voskové hmoty do matečné formy. Mezi tyto parametry patří teplota vosku, vstřikovací tlak, rychlost zaplnění dutiny formy, velikost a doba působení dotlaku a výdrž v matečné formě do rozebrání. Změny těchto parametrů jsou prakticky jedinou možností, jak ovlivnit finální rozměry voskového modelu a tudíž i konečného odlitku.



Obr. 14 Parametry ovlivňující rozměry voskového modelu [1]

3.3.2 Zhotovení keramické formy

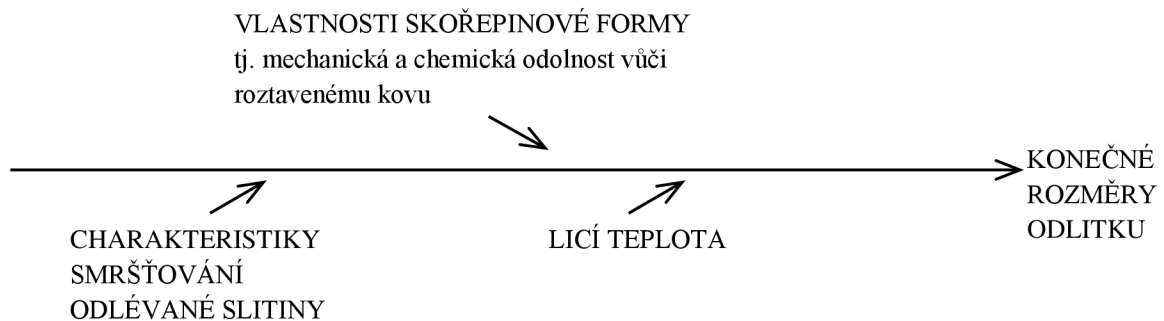
Změny rozměrů skořepinové formy lze ovlivnit především vhodnou volbou použitého keramického materiálu, počtem jednotlivých vrstev keramiky. Vliv teplot při sušení formy, vytavování vosku a následném žihání keramické skořepiny je také nezanedbatelný pro predikci rozměrových změn při zhotovení formy a tudíž ovlivnění rozměrů konečného odlitku.



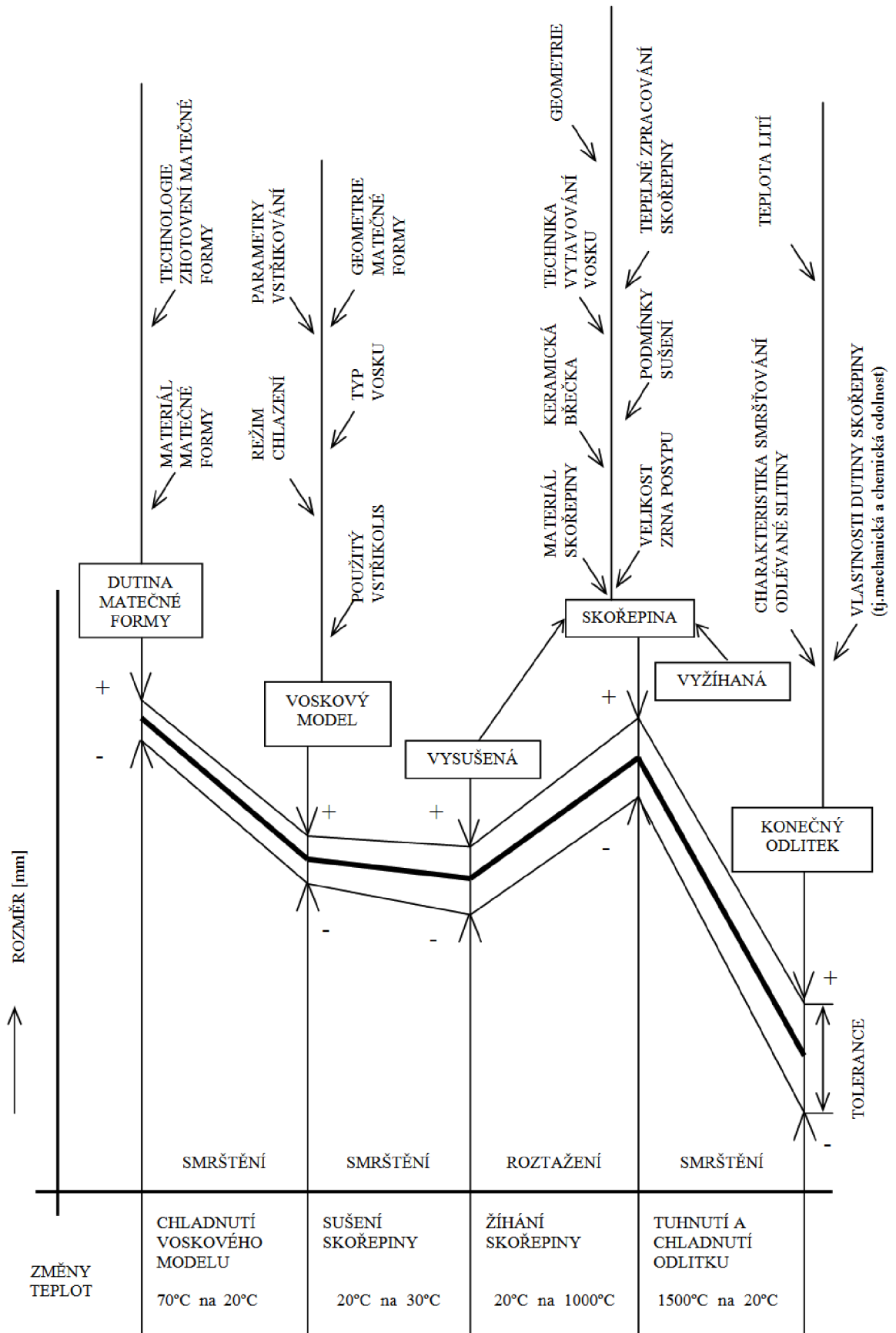
Obr. 15 Parametry ovlivňující rozměry dutiny formy [1]

3.3.3 Chladnutí a tuhnutí kovu

Při chladnutí a tuhnutí kovu dochází k jeho smrštění. Smrštění je rozdílné u různých kovů, záleží tedy na chemickém složení odlévané slitiny. Dalším parametrem, který ovlivňuje smrštění je teplota lití. Optimální lící teplota závisí na tvaru odlitku, tloušťce jeho stěn a je nutno tuto teplotu udržovat v poměrně úzkém rozmezí, aby nedocházelo k výskytu vad v odlitku. Parametry ovlivňující konečné rozměry odlitku jsou na obr. 16.



Obr. 16 Parametry ovlivňující finální rozměry odlitku [1]



Obr. 17 Rozměrové změny u technologie vytavitelného modelu [1]

4 VYPAŘITELNÝ (SPALITELNÝ) MODEL [14, 15]

Technologie výroby odlitků odlévaných na polystyrenový model byla patentována 15. dubna roku 1958 panem Shroyerem. Původně byla tato metoda uplatňována při výrobě velkých kusových odlitků. Další uplatnění této technologie bylo u uměleckých odlitků. První průmyslový odlitek, zhotovený pomocí polystyrenového modelu, byl vyroben v roce 1962 v SRN a jeho hmotnost byla 12 t. Výsledkem velkého rozmachu technologie LSM (lití na vypařitelný (spalitelný) model) bylo založení asociace LSM v roce 1967. Tato asociace spojila 150 slévárenských provozů s celkovou výrobou 800 t odlitků za den.

Prudký rozvoj aplikací pro kusovou výrobu vyvolaly především potřeby automobilového průmyslu. Této technologii se s výhodou využívá u odlitků lisovacího nářadí (obr. 18).



Obr. 18 Lisovací nářadí [16]

Současné požadavky zákazníků z automobilového průmyslu se stále stupňují. To se týká především tvaru, složitosti, jakosti a v neposlední řadě je také základním kritériem termín dodání odlitku a jeho cena. Všechny tyto požadavky dokáže metoda lití na vypařitelný model splnit.

Výroba odlitků metodou vypařitelného modelu nabízí mnoho předností a výhod, například možnost vyrobit složitý odlitek bez jader, bez úkosů v dělicí rovině, a s nízkými náklady na modelové zařízení. Zhotovit touto technologií bezchybný odlitek je však stále značně obtížné a vyžaduje důsledné zohlednění kinetiky i dynamiky vývinu plynů, které mají zásadní vliv na jakost odlitků.

4.1 Princip

a) Výroba částí modelu

Nejpoužívanějším materiálem na zhotovení vypařitelného modelu je expandovaný slévárenský polystyren (EPS). Tento polystyren se od ostatních typů, které se používají např. ve stavebnictví, odlišuje tím, že neobsahuje žádné zhášedla (látky brzdící hoření). Nejdůležitější charakteristikou tohoto polystyrenu je jeho měrná hmotnost. Čím vyšší je měrná hmotnost, tím je polystyren pevnější a také odolnější proti poškození a deformacím, ale na druhou stranu má také vyšší vývin plynů při vypařování, což je nežádoucí vlastnost. Optimální hodnota polystyrenových materiálů určených pro metodu vypařitelného modelu se uvádí okolo 20 kg/m^3 .



Obr. 19 Výroba částí modelu [17]

Jednotlivé části modelu se prakticky vyrábí dvěma způsoby a to obráběním z velkých polystyrenových bloků nebo zpěňováním v kovových formách, kde jsou výchozím materiálem kuličky polystyrenu. Výroba modelu zpěňováním (lost foam) se používá při sériové výrobě, jelikož náklady na zhotovení formy jsou velmi vysoké a tudíž se nevyplatí ji vyrábět pro menší množství odlitků. Naopak pro případ výroby prototypů a kusové výroby se části modelu vyrábí z polystyrenových bloků obráběním na CNC strojích nebo se vyřezávají pomocí horkého drátu.

b) Lepení částí a sestavení finálního modelu s vtokovou soustavou

Po vytvoření jednotlivých částí modelu jsou v dalším kroku tyto části slepeny spolu s vtokovou soustavou. K tomu slouží speciální tavné lepidlo určené k lepení polystyrenu. Použití lepidla by mělo být co nejvíce minimalizováno, protože tvorba plynů z lepidla je mnohem vyšší než ze samotného polystyrenu a jak je zmíněno výše, vývin plynů je u této technologie stěžejní záležitost s ohledem na jakost odlitku. Ke spojování lze také použít lepicí pásku.



Obr. 20 Finální model [17]

c) Nanesení nátěru

Při výrobě odlitků klasickou metodou se nátěrem opatřuje forma či jádro, které jsou tím chráněny před tepelným a mechanickým účinkem tekutého kovu. U technologie odlévání na vypařitelný model je natírán polystyrenový model. Nátěrové hmoty pro nátěry polystyrenových modelů mají vyšší hustotu, a to z důvodu, že polystyren velmi intenzivně přijímá vlhkost, což je negativní.

Nátěrové hmoty by měly být jakousi fyzikální bariérou mezi pískem a kovem a měly by tak zabránit penetraci kovu do formy. Měly by být také dostatečně prodyšné, aby umožnily prostup plynů, které se při vypařování modelu hojně tvoří, tudíž by se nátěry neměly nanášet v silných vrstvách a v neposlední řadě by měly mít schopnost dobře přilnout k polystyrenovému modelu. Nátěr nesmí praskat a odlupovat se, aby se nezvyšovalo množství pyrolýzních zbytků na hladině kovu.

Jako nosná kapalina se používá voda a líh. Exponovaná místa (různé otvory, kapsy, průduchy, apod.) se natírají ve dvou vrstvách, přičemž první nátěr se nanese na exponovaná místa a druhý nátěr v celé ploše modelu. Vrchní část modelu je třeba z hlediska propustnosti natírat pouze jednou a v co nejtenčí vrstvě.



Obr. 21 Nanášení nátěru [17]

Základní typy nátěrů:

- Kokso-grafitové – vhodné pouze pro menší tepelné zatížení
- Aluminosilikátové – vyvíjené pro metodu spalitelného modelu
- Zirkonové – odolné i při vyšší tepelné expozici už při tloušťce 0,5 mm

Sušení při použití vodních nátěrů se provádí cirkulací vzduchu o maximální teplotě 60 °C. Vyšší teploty by způsobily deformaci modelu.

d) Zaformování

K zaformování modelů se používá buď suchý písek bez pojiv, který se ztuhne pouze vibracemi. Tato formovací směs je 100% recyklovatelná a tedy výhodná i z ekologického hlediska. Nebo se používá běžná formovací směs spolu s pojivem. Tato směs se musí upěchovat, přičemž je třeba dbát zvýšené opatrnosti s ohledem na porušení a deformace samotného polystyrenového modelu. Rozdílem oproti ostatním technologiím je, že model se z formy nevyjímá a zůstává ve formě až do odlévání, kdy se vypaří.



Obr. 22 Zасыпání formovací směsí [17]

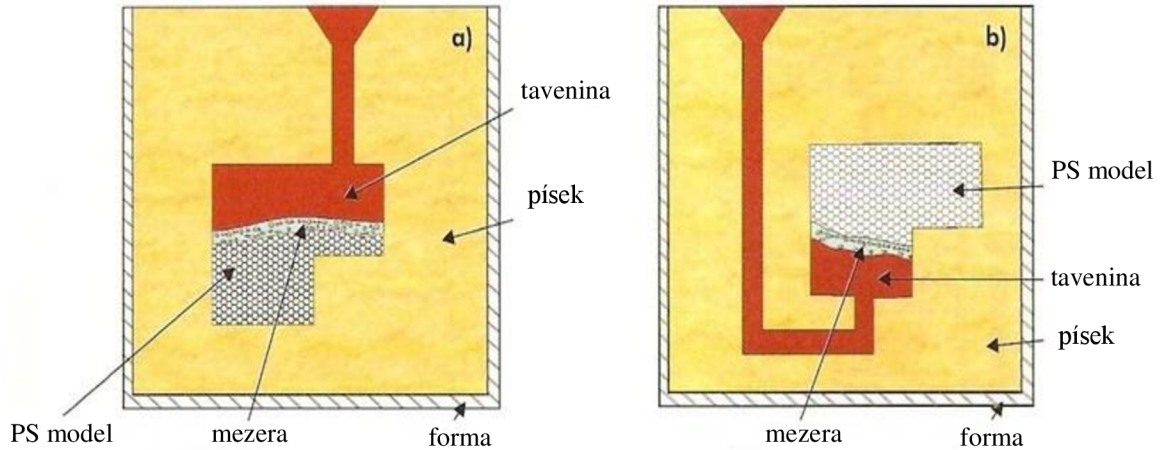
e) Odlévání

Při lití na polystyrenový model dochází k bouřlivým reakcím, kdy se odpařováním polystyrenu tvoří značné množství plynných látek. Množství plynů, vznikajících při této technologii, je v tab. 3. To je zásadní problém při této technologii, jelikož vývin plynných látek má výrazný vliv jak na jakost odlitku, tak i na bezpečnost. Podstatný vliv na kvalitu odlitku má lící teplota, která by měla být vyšší než u běžných jiných metod a také rychlost plnění by měla dosahovat co nejvyšších hodnot. Pokud by byla rychlost plnění malá, vznikala by mezera mezi polystyrenem a kovem a kapalný styren by při stékání na tekutý kov vytvářel nežádoucí látky.

Tab. 3 Vývin plynů při odlévání na vypařitelný model [14]

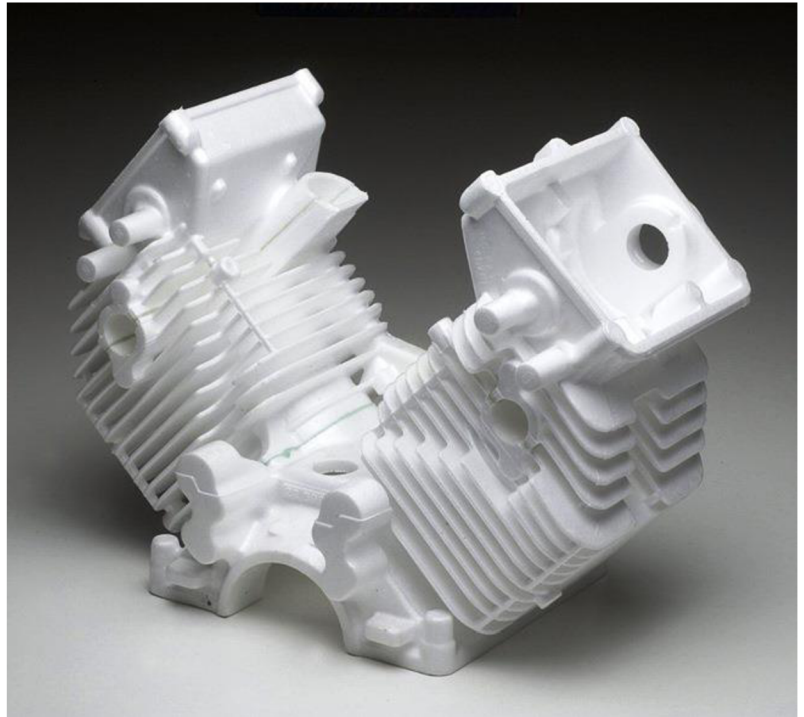
Materiál	1 g	1 cm ³
Polystyren	600 – 1000 cm ³ (záleží na vlastnostech polystyrenového materiálu)	20 cm ³
Furanová formovací směs	6 – 12 cm ³ (dle podílu pojiva)	9 – 18 cm ³

Co se týče vtokových soustav, mohou se používat dvě základní varianty. První z nich je lití na spodní vtoky a druhou variantou je lití shora. V praxi se užívají více spodní vtoky, které ovšem mají nevýhodu, která souvisí s menší plochou pro odvod plynů, kterou tvoří pouze volný prostor mezi stoupajícím kovem a ještě nesplněným modelem. Tím více se u této metody zvýrazňuje potřeba vysoké propustnosti nátěru a formovací směsi. Pro odvod plynů jsou vhodnější vrchní vtoky. Od počátku lití je pro průchod plynů volná větší část plochy, hladina kovu je zásobena teplejším kovem a tak se model zplyňuje rychleji. Lití vrchními vtoky má však také výraznou nevýhodu v členité vtokové soustavě, která spolu se slepými výfuky ztěžuje pěchování horního rámu, do kterého je celá vtoková soustava situována. Časová náročnost aplikace vlastní přípravy modelu a formování je vyšší.

**Obr. 23** Možnosti odlévání: a) vrchní vtok, b) spodní vtok [18]

4.2 Lost foam

Metodou lost foam (ztracená pěna) rozumíme sériové uplatnění technologie vypařitelného modelu. Na počátku procesu jsou výchozí surovinou pro výrobu modelu polystyrenové kuličky se zrnitostí 0,2 – 0,4 mm. Tyto kuličky obsahují vázaný pentan, který se teplem uvolňuje a působí jako nadouvadlo. První výrobní etapou je předzpěňování. Dochází k němu tak, že v předzpěňovacím zařízení se za stálého míchání surový polystyren ohřívá přehřátou párou o teplotě 120 – 130 °C. Při tomto procesu se uvolní

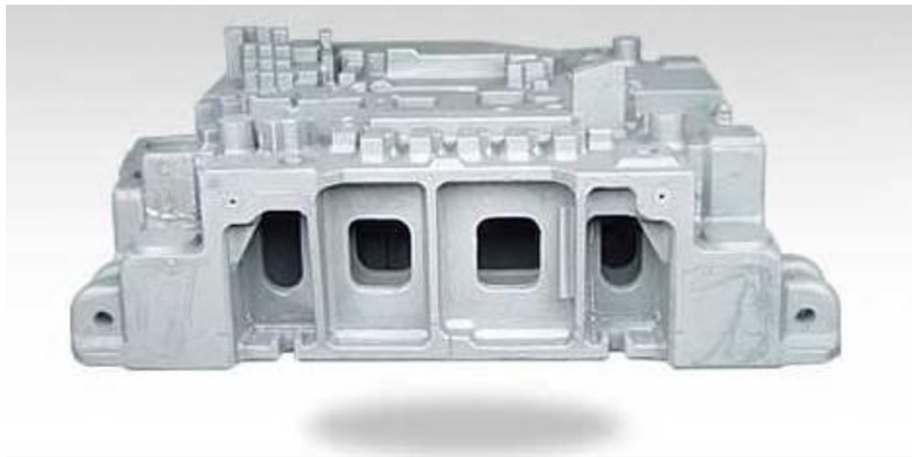


Obr. 24 Model zhotovený technologií lost foam [19]

asi 50 % pentanu a to způsobí zhruba třicetinasobnou expanzi polystyrenu. Po dosažení požadované expanze se kuličky chladí a suší foukáním studeného vzduchu. Takto upravené polystyrenové kuličky se následně skladují v sílech, kde probíhá jejich zrání a stabilizace. Výroba samotného modelového zařízení probíhá v kovových formách, které jsou zhotoveny obráběním. Dutina formy se vyplní kuličkami předzpěněného polystyrenu. Systémem průduchů se do dutiny formy přivádí pára o teplotě 120 – 130 °C, což opět způsobí expanzi polystyrenu vlivem uvolňování zbývajících pentanu. Tímto se polystyrenové kuličky v uzavřené dutině formy pevně svaří. Expanze se ukončí tak, že se uzavře přívod páry a forma se intenzivně chladí studenou vodou. Následuje vakuování dutiny formy, při kterém se odstraní zkondenzovaná voda. Forma se rozebere a hotový model se následně suší proudem teplého vzduchu s teplotou 40 – 50 °C. Další etapou je kompletace modelu lepením. Tvar se doplní o různá žebra a výstupky, které nebyly na modelu vytvořeny z důvodu, že by příliš zkomplikovali konstrukci formy. Rovněž se přilepí i části vtokové soustavy. K lepení dalších částí se používá horké tavné lepidlo, případně lepicí páska. Zkompletovaný model s vtokovou soustavou se poté opatří žáruvzdorným nátěrem. Dále se model musí dobře vysušit. Toto se provádí pomocí proudícího vzduchu, který má teplotu asi 60 °C. Tento již hotový model se zaformuje pouze do suchého písku, který se ztuhne vibracemi. V případě technologie lost foam se nepoužívá žádné pojivo, tudíž je formovací směs 100% recyklovatelná. Dalším krokem je už samotné odlévání a poté dokončovací operace.

4.3 Full mould

Název full mould vznikl od faktu, že se při této metodě model před samotným odléváním nevyjímá z formy, vypaří se proudem roztaveného kovu, a odlévání tudíž probíhá do plné formy. Tato technologie se využívá převážně při kusové výrobě velkých odlitek (například lisovací nářadí). Model se zhotoví obrobem polystyrenových bloků, případně jejich následným slepením. Zaformování modelu může být opět do formovací směsi bez pojiva, ale zpravidla se používají běžné formovací směsi s pojivem. Velkou výhodou této technologie je krátký čas potřebný ke zhotovení modelu a také jeho cena. Těchto výhod se hojně využívá při výrobě prototypových dílů.



Obr. 25 Model pro odlitek lisovacího nářadí [20]

4.4 Spalitelný model

Princip odlévání na spalitelný model je obdobný jako při technologii vytavitelného voskového modelu pouze s tím rozdílem, že model je zhotoven místo vosku z polystyrenu. To znamená, že po výrobě modelu následuje obalení modelu keramickou hmotou a při následném vyžhání v peci dojde jak k vytvrzení keramické skořepiny, tak ke spálení polystyrenového modelu. Odlévání tedy neprobíhá do plné formy, jak tomu bylo v předchozích případech, ale do dutiny.

4.5 Parametry technologie vypařitelného modelu

Tab. 4 Přehled parametrů dosahovaných metodou vypařitelného modelu [13]

Metoda lití	Rozměry [mm]	Tolerance IT	Hmotnost [kg]	Tloušťka stěny [mm]	Drsnost Ra [μm]
Vypařitelný model	10 až $5 \cdot 10^3$	12	1 až 10^5	2 až 600	12,5 až 100

5 TLAKOVÉ (VYSOKOTLAKÉ) LITÍ [21, 22, 23, 24]

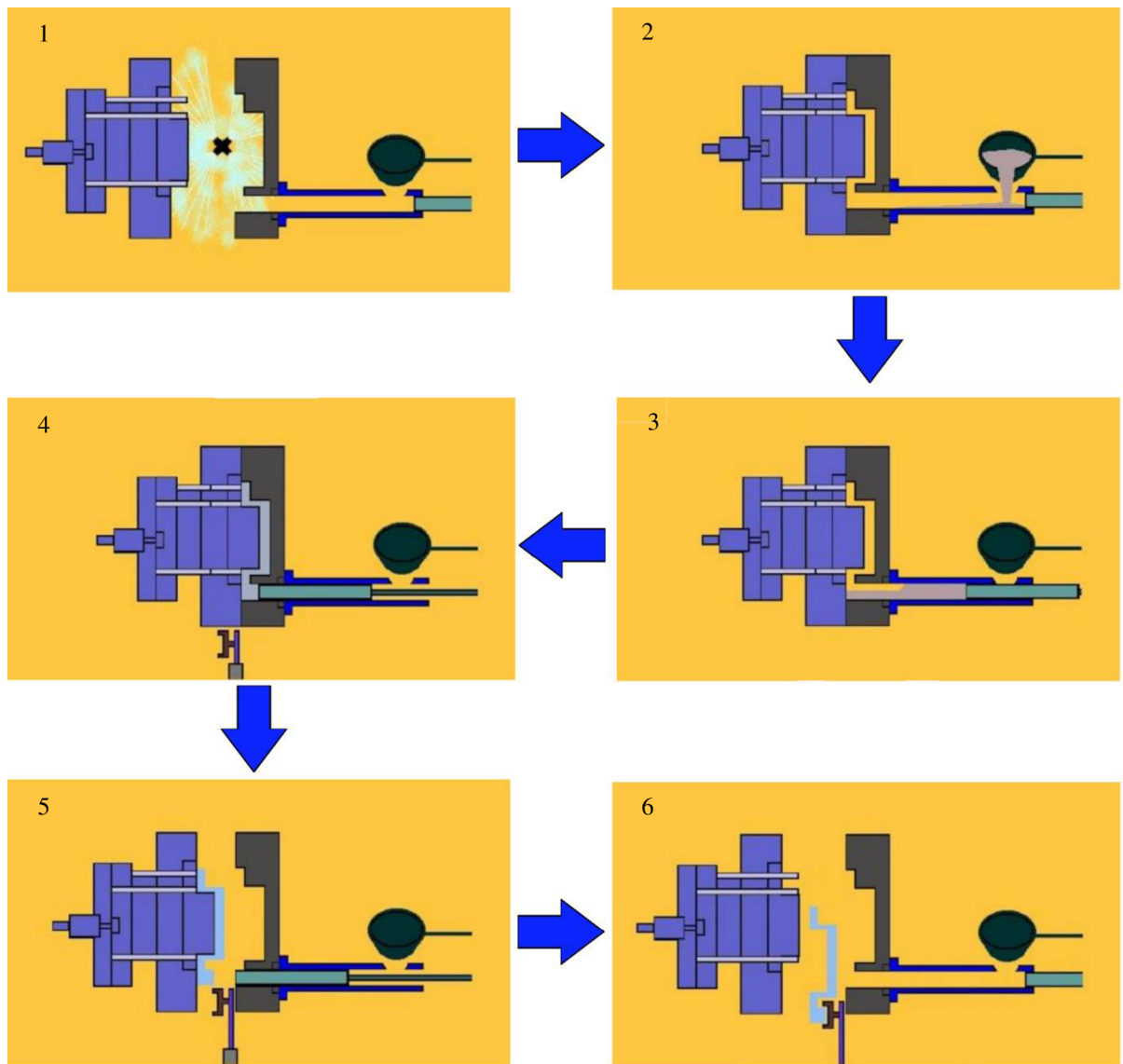
V oblasti výroby odlitků ze slitin neželezných kovů, zejména hliníku, hořčíku a zinku, zaujímá stěžejní postavení technologie tlakového lití. Výroba odlitků litých pod tlakem je dnes rozšířena pro řadu technických výhod jako například možnost výroby odlitků složitých tvarů s tenkými stěnami, předlitými otvory, hladkým povrchem a vysokou rozměrovou přesností. Značnou výhodou této metody je také velmi vysoké využití tekutého kovu. Mimo jiné je také z hlediska užitných vlastností důležitá jemnozrná krystalická struktura odlitků vyrobených touto metodou. Při tlakovém lití má na velikost krystalizačního zárodku vliv jak podchlazení taveniny způsobené vysokou akumulací schopností kovové formy, tak také tzv. artemické podchlazení, které je způsobeno vysokým tlakem působícím na tuhnoucí taveninu (tzv. dotlak). Vysoké hodnoty tohoto tlaku na jedné straně snižují životnost formy a zvětšují prostoje tlakových strojů, na druhé straně zvyšují dolití odlitků a snižují porezitu (objem vzduchu, který je ve ztuhlých odlitcích uzavřen) a tím zlepšují těsnost a pevnost odlitku. Vnitřní porezita odlitků je největší nevýhodou tlakového lití. V procesu tlakového lití probíhá plnění dutiny formy vysokou rychlostí, což může mít za následek disperzní proudění, které negativně ovlivňuje výslednou kvalitu odlitku.

5.1 Princip

Při tlakovém lití je roztavený kov vstříkovan vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem do kovové formy kde dojde k jeho ztuhnutí. Technologii tlakového lití dále rozlišujeme na lití s teplou komorou a na lití se studenou komorou. Původní stroje s teplou tlakovou komorou dnes více nahrazují stroje se studenou tlakovou komorou, o jejichž vývoj se nejvíce zasloužil český inženýr Josef Polák, kterému byl udělen v roce 1927 patent na lící stroj, od kterého je tavicí pec oddělena. Tavenina se vlévala do vertikální tlakové komory a tlakem pístu se dopravovala do dutiny formy. Dalším pokrokovým prvkem byla konstrukce tlakových strojů s horizontální tlakovou komorou. Tyto stroje dosahují vyššího pracovního výkonu, lepšího využití kovu a současně se vyznačují jednodušším vstříkovacím systémem a tím i spolehlivostí provozu, a proto si tato konstrukce našla značné uplatnění.

Lící cyklus tlakového lití (viz obr. 26 na další straně):

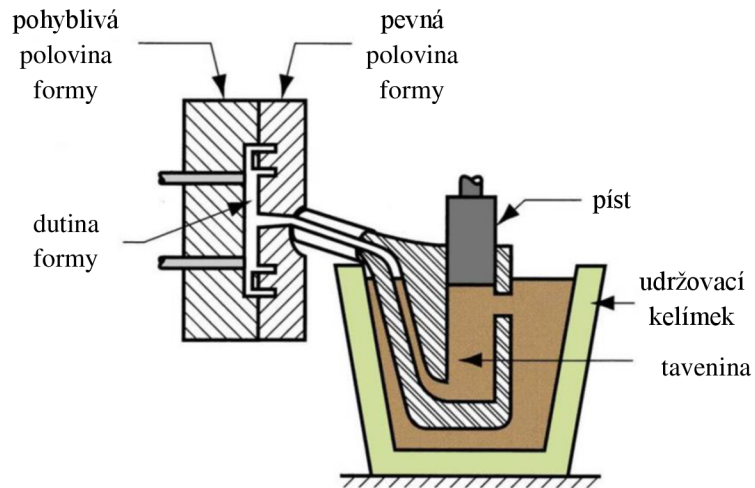
- a) Ošetření líce formy separační látkou
- b) Uzavření lícího stroje včetně zajetí pohyblivých jader a namazání lícího pístu
- c) Nadávkování taveniny do lící komory a natlačení kovu do tlakové lící formy
- d) Tuhnutí kovu za působení vysokého tlaku (až 100 MPa)
- e) Otevření formy včetně vyjetí pohyblivých jader
- f) Vyhození hotového odlitku z formy a vyjmutí ze stroje



Obr. 26 Princip technologie tlakového lití [25]

5.1.1 Stroje s teplou lící komorou

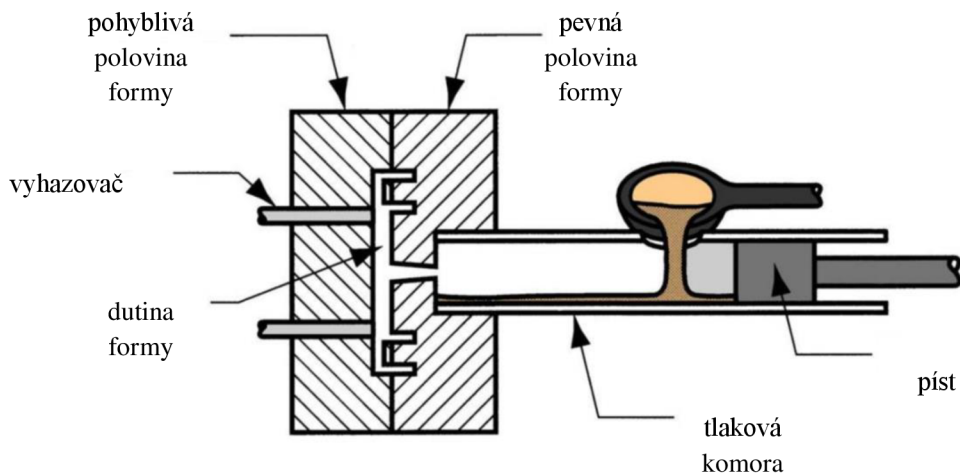
U strojů s teplou lící komorou je udržovací kelímek součástí lícího stroje. V prvním kroku se zvedne píst a tím se uvolní plnicí otvor, kterým nateče do tlakové komory tavenina. V dalším kroku se píst pohybuje směrem dolů, uzavře plnicí otvor a natlačí roztavený kov do dutiny formy. Tlak na kov působí až do ztuhnutí. Poté se pohyblivá část formy odsune a odlitek je vyhozen vyhazovači. Schéma stroje s teplou lící komorou je na obr. 27. Touto metodou se odlévají převážně slitiny hořčíku a zinku, které nereagují s pístem a tlakovou komorou. Existuje i druhá varianta, kde místo pístu vyvozuje tlak stlačený vzduch.



Obr. 27 Schéma stroje s teplou komorou [26]

5.1.2 Stroje se studenou lící komorou

U lití se studenou komorou se tlaková komora nachází mimo taveninu. Výhodou je, že namáhání vstříkacího ústrojí je podstatně menší. Stroje se studenou lící komorou jsou buď s vertikální, nebo s horizontální komorou (obr. 28), která je rozšířenější z důvodu jednodušší konstrukce. Princip je takový, že dávka roztaveného kovu se nalije do tlakové komory a poté je pístem vstříknuta do dutiny formy, kde tuhne za zvýšeného tlaku. Tímto se odlévají slitiny hliníku a mědi.



Obr. 28 Schéma stroje se studenou lící komorou [26]

5.2 Parametry technologie vysokotlakého lití

Tab. 5 Přehled parametrů dosahovaných metodou vysokotlakého lití [13]

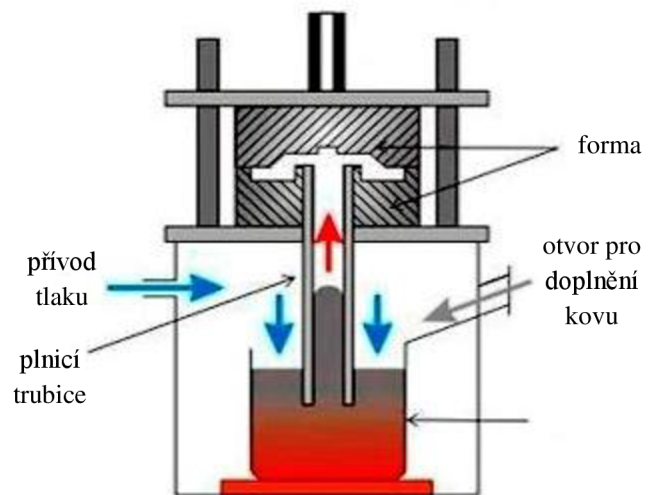
Metoda lití	Rozměry [mm]	Tolerance IT	Hmotnost [kg]	Tloušťka stěny [mm]	Drsnost Ra [μm]
Vysokotlaké lití	1 až $2 \cdot 10^3$	10	10^{-3} až 15	0,4 až 15	1,6 až 12,5

6 NÍZKOTLAKÉ LITÍ [27, 28]

Dalším způsobem výroby odlitků za zvýšeného tlaku je nízkotlaké lití. Pro tuto metodu je charakteristické uspořádání takové, že forma je umístěna v nejvyšším bodě a tavenina je do ní vytlačována z kelímku přes plnicí trubici pomocí přetlaku působícího na hladinu kovu. Přetlak u této technologie je nižší (tedy i rychlost plnění je menší) než u vysokotlakového lití a hladina roztaveného kovu zaplňuje dutinu formy klidně, s minimálními turbulencemi. Tato metoda se používá pro nízkotavitelné slitiny kovů a lze jí zhotovit odlitky s velmi tenkou stěnou. Nízkotlaké odlitky vykazují velmi jemnou a těsnou materiálovou strukturu bez pomezity, kvalitní povrch a dobré mechanické vlastnosti.

6.1 Princip

Nejprve se při nižším tlaku vysušeného vzduchu nebo plynu na hladinu kelímku vytlačí kov plnicí trubicí do formy a až je forma téměř zaplněna, tlak se zvýší a udržuje tak dlouho, dokud odlitek neztuhne. Usměrněné tuhnutí probíhá odshora dolů, což je zcela opačný směr než u gravitačního lití. Tuhnutí končí v ústí plnicí trubice a přebytečný kov se vypouští zpět do kelímku, tím prakticky odpadá potřeba náliček a vtokové soustavy, proto využití kovu touto



Obr. 29 Princip nízkotlakého lití [29]

technologíí dosahuje velmi vysokých hodnot (více než 90 %). Jak je již zmíněno výše, proudění taveniny je klidné, což má za následek vysokou kvalitu odlitků. Po ztuhnutí odlitku se horní díl formy zvedne a odlitek se vyjme. Formy mohou být z různých materiálů a jsou obvykle s horizontální dělicí rovinou. Stejně jako plnicí trubice mohou i formy být kovové, keramické nebo grafitové.

6.2 Parametry technologie nízkotlakého lití

Tab. 6 Přehled parametrů dosahovaných metodou nízkotlakého lití [13]

Metoda lití	Rozměry [mm]	Tolerance IT	Hmotnost [kg]	Tloušťka stěny [mm]	Drsnost Ra [μm]
Nízkotlaké lití	50 až 10 ³	12	0,5 až 10 ³	2 až 50	3,2 až 12,5

SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ

Přehledné srovnání různých dosahovaných parametrů jednotlivých slévárenských technologií a také ekonomičnost série je zobrazeno v tab. 7. V této tabulce jsou uvedeny nejen technologie blíže popsané v této práci, ale také jiné používané slévárenské technologie.

Tab. 7 Srovnání různých technologií lití [13]

Metoda lití	Tolerance IT	Nejmenší tloušťka stěny [mm]	Nejlepší drsnost Ra [μm]	Ekonomičnost série [ks]
Pískové formy	15	3	12,5	1 až 100 (ručně)
				nad 100 (strojně)
Skořepinové formy (Croning)	13	2	6,3	10^2 až 10^4
Sádrové formy	12	1	1,6	1 až 10^4
Vakuové formy	14	2	12,5	10^2 až 10^3
Vytavitelný model	10	0,2	1,6	10^2 až 10^4
Vypařitelný model	12	2	12,5	1 až 10^5
Keramické formy (Shaw)	13	2	3,2	1 až 10^3
Kokily	12	2	3,2	10 až $5 \cdot 10^3$
Odstředivé lití	12	5	6,3	10^3 až 10^4
Nízkotlaké lití	12	2	3,2	10^3 až 10^5
Vysokotlaké lití	10	0,4	1,6	10^3 až 10^5

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shromáždit základní informace o různých slévárenských technologiích a jejich porovnání vzhledem k dosahované rozměrové přesnosti odlitků. Vybrané slévárenské technologie jsou porovnávány i s ohledem na další dosahované parametry jako například nejmenší dosažitelná tloušťka stěny odlitku, drsnost povrchu a také ekonomičnost série.

Detailněji je popsána technologie vytavitelného modelu, u které je model zhotoven z vosku, následně obalen keramickou skořepinou a po odstranění (vytavení) vosku a vyžhání skořepiny se odlévá. Výhody této technologie jsou vysoká přesnost odlitků (IT 10), rozmanitost odlévaných materiálů a možnost vyrábět tvarově složité součásti. Mezi nevýhody metody vytavitelného modelu patří převážně vysoké náklady na zhotovení matečné formy pro výrobu modelů, z čehož plyne, že touto metodou se vyplatí vyrábět zakázky větších sérií.

Jako další je popsána technologie vypařitelného modelu z expandovaného polystyrenu. Tato metoda je specifická tím, že odlévání probíhá do plné formy, což znamená, že model se z formy nevyjímá a tekutý kov se neodlévá do dutiny, ale přímo na model, který se teplotou taveniny vypaří. Odpadá tak potřeba úkosů, spojených s vyndáváním modelu z formy. Samotné odlévání pak probíhá do pískových forem. Tato technologie má značnou výhodu při výrobě prototypových odlitků, jelikož čas zhotovení modelu (obrobení polystyrenového bloku) je velmi krátký. Díky tomu tato metoda nachází uplatnění u velkých odlitků lisovacího nářadí pro automobilový průmysl. Nevýhodou je vysoký vývin plynů při vypařování polystyrenu, což negativně ovlivňuje jakost finálních odlitků.

U posledních dvou popsaných technologií se využívá zvýšených tlaků při odlévání. Jsou to technologie nízkotlakého lití, při němž hladina kovu stoupá do dutiny formy velmi klidně a tuhnutí odlitku probíhá odshora, což je odlišné oproti jiným slévárenským technologiím a technologie tlakového lití, při kterém na tuhnoucí kov působí tlak až 100 MPa. Výhody jsou vysoké využití kovu (více než 90 %), kvalita povrchu odlitku a přesnost (IT 10 u tlakového lití). Na druhou stranu je u odlitků vyrobených tlakovým litím velká pórovitost, která zhoršuje mechanické vlastnosti.

Přesnost odlitku neboli jeho tolerance musí být vždy vztažena ke konkrétnímu jmenovitému rozměru. Na přesnost má vliv značné množství parametrů vstupujících do procesu jako například přesnost zhotovení modelu, formy, změny teplot okolí, odlévaný materiál a mnohé další. Všechny tyto vlivy musí technolog znát a uvažovat, aby výsledný odlitek splňoval parametry požadované zákazníkem. Metodologie Six Sigma, popsána v této práci, se zabývá sledováním celého procesu výroby, jeho zlepšováním a snahou docílit výroby co nejmenšího množství zmetkových výrobků.

Dle mého názoru nelze jednoznačně určit, která z technologií zhotovení odlitku je nejvhodnější. Prakticky každá metoda má své uplatnění při výrobě odlitků a je na zvážení technologa, jaká technologie je pro ten konkrétní tvar odlitku, jeho velikost a potřebné mechanické vlastnosti vhodná. Dále musí brát v potaz velikost série, materiál a v neposlední řadě také výslednou cenu odlitku.

SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu: Dimensional accuracy of investment castings: zkrácená verze habilitační práce* [online]. Brno: VUTIUM, 2004 [cit. 2016-03-09]. ISBN 80-214-2558-x.
- [2] CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0-7506-4790-6.
- [3] HORÁČEK, Milan, Pavel MICHALČÍK a Jaroslav WIEDERMANN. Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu: Dimensional changes during investment casting technology. *Slévárství*. 2005, **LIII**(1), 7 - 18.
- [4] Six Sigma. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Six_Sigma
- [5] SIX SIGMA – Nová metodika so starými nástrojmi. *FBE Bratislava, s. r. o.* [online]. 2007 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.sixsigma.sk/uvod.htm>
- [6] PANDE, Peter S, Robert P NEUMAN a Roland R CAVANAGH. *Zavádíme metodu Six Sigma, aneb, Jakým způsobem dosahují renomované světové společnosti špičkové výkonnosti*. 1. vyd. Brno: TwinsCom, c2002. ISBN 80-238-9289-4.
- [7] DMAIC - Model řízení Six Sigma projektu. *Svět produktivity* [online]. 2012 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.svetproduktivity.cz/slovník/DMAIC-Model-řízení-Six-Sigma-projektu.htm>
- [8] Jaký je výkon Six Sigma? In: *SlidePlayer* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://images.slideplayer.cz/7/1999830/slides/slide_8.jpg
- [9] DMAIC. In: *Troy Sellberg* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.troysselberg.com/wp-content/uploads/2015/08/IMG_8393.jpg
- [10] SUCHOMEL, Antonín. Výroba přesných odlitků v České republice. *Slévárství*. 2005, **LIII**(1), 3.
- [11] SOUKUPOVÁ, Lucie, Milan HORÁČEK, Patrik VAŠŤÁK a Thomas KRUMREI. Optimalizace technologie skořepinové formy pro odlitky ze slitin Al litých metodou vytavitelného modelu: Optimized ceramic shell for manufacturing of aluminium castings using lost wax technology. *Slévárství*. 2014, **LXII**(5 - 6), 152 - 155.
- [12] SOUKUPOVÁ, Lucie. *Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[13] BARTOŠ, Filip. *Technologie zhotovení odlitků na hotovo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 30 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

[14] JUŘIČKA, Ivo a Otto NOVOTNÝ. Specifika technologie výroby odlitků litých na spalitelný model. *Slévárenství*. 2005, **LIII**(4), 169 - 173.

[15] Lost foam - výroba odlitků metodou spalitelného modelu. In: *Streamtech.tv* [online]. 2011 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.streamtech.tv/video-108-lost-foam-vyroba-odlitku-metodou-spalitelneho-modelu.htm>

[16] Lisovací náradí. In: *Cdn* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://cdn.i0.cz/public-data/45/78/77256a3336c8a57a356663b622b8_w640_h430_gi:photo:330824.jpg?hash=0116b540524c386a60f665c826a7109e

[17] Lost foam casting. In: *Rapid Product Development Resource Centre* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/images/facilities/Rapid%20Casting/Lost%20Foam%20Casting/equipment/logo/Lost%20foam%20casting.JPG>

[18] HÝBAL, Ondřej. *Metoda liti na spalitelný model*. Brno, 2015. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[19] Piece-creaform. In: *Knauf industries* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.knauf-industries-solutions.com/images/calages_automobiles/piece_tx/piece-creafoam.jpg

[20] Seahaw6. In: *Tamico* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.tamico.or.kr/data/prod/sehaw6.jpg>

[21] NOVÁKOVÁ, Iva a Iva NOVÁ. Struktura vysokotlakých odlitků ze slitin Al-Si. *Slévárenství*. 2009, **LVII**(3 - 4), 75 - 79.

[22] Vplyv technologických parametrov tlakového litia na štruktúru odliatkov. *Slévárenství*. 2009, **LVII**(3 - 4), 80 - 82.

[23] NOVÁ, Iva, Zdeněk HOŠEK a Iva NOVÁKOVÁ. Rozvoj tlakového lití. In: *MM spektrum* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti.html>

[24] Tlakové lití. *Silesia-Tech s. r. o.* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.silesia-tech.cz/tlakove-liti>

[25] Výroba odlitků ze slitin hliníku. *Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf

[26] Casting CH 11 Part 3. *QUIA* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z:
<https://www.quia.com/jg/1961563list.html>

[27] Nízkotlaké lití. *Silesia-Tech s. r. o.* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z:
<http://www.silesia-tech.cz/nizkotlake-liti>

[28] Výroba odlitků ze slitin hliníku. *Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf

[29] Low-pressure-die. In: *TheMetalCastings.Com* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z:
<http://www.themetalcasting.com/gifs/low-pressure-die.jpg>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Průměrné hodnoty rozměrových tolerancí u různých slévárenských technologií	9
Obr. 2 Rozdělení forem a modelů podle jejich potenciálu k dosažení rozměrové přesnosti	10
Obr. 3 Porovnání různých úrovní sigma	12
Obr. 4 Metodika DMAIC.....	13
Obr. 5 Bronzová figura tanečnice (Indie ~ 3000 př. n. l.).....	14
Obr. 6 Bronzová hlava (Benin – 12. stol. n. l.)	14
Obr. 7 Výroba modelu	15
Obr. 8 Sestavování stromečku	15
Obr. 9 Výroba skořepinové formy	16
Obr. 10 Vytavování vosku	17
Obr. 11 Lití kovu	17
Obr. 12 Odstranění skořepiny a odřezání odlitků	18
Obr. 13 Dosažitelné tolerance v závislosti na jmenovitém rozměru	19
Obr. 14 Parametry ovlivňující rozměry voskového modelu	20
Obr. 15 Parametry ovlivňující rozměry dutiny formy	21
Obr. 16 Parametry ovlivňující finální rozměry odlitku	21
Obr. 17 Rozměrové změny u technologie vytavitelného modelu.....	22
Obr. 18 Lisovací nářadí	23
Obr. 19 Výroba částí modelu.....	24
Obr. 20 Finální model	24
Obr. 21 Nanášení nátěru	25
Obr. 22 Zасыpání formovací směsí	25
Obr. 23 Možnosti odlévání: a) vrchní vtok, b) spodní vtok.....	26
Obr. 24 Model zhotovený technologií lost foam	27
Obr. 25 Model pro odlitek lisovacího nářadí	28
Obr. 26 Princip technologie tlakového lití.....	30
Obr. 27 Schéma stroje s teplou komorou.....	31
Obr. 28 Schéma stroje se studenou lící komorou	31
Obr. 29 Princip nízkotlakého lití.....	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Efektivita výroby v závislosti na dosažení určité úrovně sigma	12
Tab. 2 Přehled parametrů dosahovaných metodou vytavitelného modelu	19
Tab. 3 Vývin plynů při odlévání na vypařitelný model	26
Tab. 4 Přehled parametrů dosahovaných metodou vypařitelného modelu	28
Tab. 5 Přehled parametrů dosahovaných metodou vysokotlakého lití	31
Tab. 6 Přehled parametrů dosahovaných metodou nízkotlakého lití.....	32
Tab. 7 Srovnání různých technologií lití	33