



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA ODLITKU HLAVY VÁLCE PRO RENOVACI MOTORU JAWA 50

MANUFACTURE OF CYLINDER HEAD CASTING FOR ENGINE RENOVATION JAWA 50

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Pastyřík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bořil

BRNO 2020

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Petr Pastyřík</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Bořil</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Výroba odlitku hlavy válce pro renovaci motoru Jawa 50

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při renovaci starých veteránů automobilů nebo motocyklů je někdy obtížné najít původní náhradní díly. Využití metod rapid prototypingu je jedna z cest, jak v poměrně krátkém čase získat požadovaný díl v momentě, kdy není dostupný na trhu s náhradními díly.

### Cíle bakalářské práce:

Student s využitím metod rapid prototyping navrhne technologii výroby odlitku určeného pro renovaci motoru motocyklu. Na základě navržené technologie bude následně součást odlita a student provede zhodnocení navržené technologie.

### Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R. Foundry technology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, x, 719 s. : il., čb. fot. ; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.

HORÁČEK, M. Slévárenská technologie I. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 166 s. ISBN 80-214-0217-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

PASTYŘÍK Petr: Výroba odlitku hlavy válce pro renovaci motoru Jawa 50.

Tato práce se zabývá výrobou odlitku hlavy válce pro renovaci motoru Jawa 50. Na základě literární studie vhodných slévárenských technologií a využití 3D tisku ve slévárenství byla navržena technologie výroby odlitku a hlava válce byla vyrobena. Součást byla navržena v CAD programu a model byl vytištěn na 3D tiskárně. Model byl zaformován do keramické skořepinové formy a po vytavení modelu a vyžihání formy byla součást odlita. Následovalo čištění odlitku a obrábění.

Klíčová slova: Odlitek, 3D tisk, hlava válce, metoda vytavitelného modelu, Jawa 50

## **ABSTRACT**

PASTYŘÍK Petr: Manufacture of cylinder head casting for engine renovation Jawa 50.

This project elaborates the manufacture of a cylinder head casting for an engine renovation of Jawa 50. Based on the literary pursuit of suitable foundry technologies and using 3D printing in foundry a casting production technology was designed and the cylinder head was made. The part was designed in the CAD software and then printed on a 3D printer. The printed model was formed in ceramic shell form, then melted and the form was annealed. After that the cast was casted. The last operations were fettling and finishing machining.

Keywords: Cast, 3D printing, cylinder head, Lost-wax casting, Jawa 50

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PASTYŘÍK, Petr. Výroba odlitku hlavy válce pro renovaci motoru Jawa 50 [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124560>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Petr Bořil.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 26.6.2020

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Petru Bořilovi za pomoc, cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu během mého studia.

# OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	str.
ÚVOD .....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ .....	10
1.1 Výrobní možnosti .....	10
2 METODY LITÍ S VYTAVITELNÝM A VYPAŘITELNÝM.....	11
2.1 Vytavitelný model .....	11
2.1.1 Postup výroby.....	11
2.1.2 Výhody a nevýhody vytavitelného modelu.....	13
2.1.3 Voskové materiály.....	14
2.1.4 Využití vytavitelného modelu v praxi .....	15
2.2 Vypařitelný model.....	15
2.2.1 Princip .....	15
2.2.2 Výhody a nevýhody .....	16
2.2.3 Materiály modelů .....	16
2.2.4 Možnosti výroby modelů .....	16
2.2.5 Nátěry modelů .....	17
2.2.5 Postup výroby Lost foam .....	17
2.2.6 Postup výroby Full mould .....	18
3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VE SLÉVÁRENSTVÍ.....	20
3.1 3D tisk modelového zařízení pro lití do písku .....	20
3.1.1 3D tisk písku.....	21
3.1.2 3D tisk jader .....	21
3.1.3 Böhmerland 21 .....	22
3.2 3D tisk pro vytavitelné modely .....	22
3.2.1 Tisk nevoskových modelů.....	23
4 VÝROBA ODLITKU HLAVY VÁLCE PRO MOTO JAWA 50 .....	25
4.1 Modelování v CAD .....	26
4.2 3D tisk modelu .....	27
4.3 výroba skořepinové formy .....	28
4.4 odlévání .....	29
4.5 čištění a obrábění.....	30
4.6 Vady a zhodnocení .....	31
ZÁVĚR.....	34

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam výkresů



## ÚVOD

Při renovaci starých motocyklů je dbáno na historickou přesnost a dochování původních dílů. Mezi sběrateli mají největší hodnotu převážně stroje v původním stavu, bez jakéhokoliv zásahu do původních dílů. Bohužel během renovace se často objeví součást, která již dávno neplní svoji funkci a nelze ji rozumně použít ani opravit. Ve chvíli, kdy nastane tato situace, přicházejí na řadu většinou tři možnosti.

První možností, v komunitě majitelů veteránů uznávanější, je sehnat původní, originální díl. Tato možnost se z pravidla se stářím stroje a nižším počtem vyrobených kusů snižuje a u spousty strojů jsou původní díly velmi drahé, nebo se v horším případě nedají sehnat vůbec.

Jestli není možné sehnat původní díl, je tady druhá možnost a to použití repliky. Tyto díly jsou většinou podstatně levnější oproti originálu, na první pohled téměř totožné a většinou odvedou stejnou práci jako díl původní. Nevýhodou je, že replika se dá sehnat pouze pro některé díly, především ke strojům vyrobených ve velkých sériích.

Třetí možností je potřebnou součást vyrobit, zde je možné využít jinou, podobnou součást, která je následně upravena, aby odpovídala požadované původní, nebo vyrobit celý díl znovu.

V případě vyrábění celého kusu přichází na řadu volba vhodné technologie. Bývá vhodné zvolit technologii, kterou byl původní díl vyráběn a následně ji lze modifikovat podle pokroků v daném oboru a možnostmi konkrétního provozu, dílny kde bude součást vyráběna.

Spousta dílů motoru a převodové skříně je vyrobena odléváním. Nejrozšířenější technologie výroby těchto dílů je lití do písku a tlakové lití.

Dnešní doba přináší využití počítačů jak pro návrh a konstrukci odlitku i modelu, tak existuje i možnost softwarů k simulaci různých způsobů odlévání, tepelných procesů, nebezpečí vzniku vad.

CNC obrábění umožňuje výrazně urychlit výrobu modelů i kovových forem.

V současnosti se stává populární využití 3D scannerů, kdy lze rychle vytvořit virtuální model již existující součásti, nebo zkontrolovat přesnost rozměrů vyráběných kusů. Při metodách rapid prototyping se na 3D tiskárně poměrně rychle a jednoduše dá zhotovit hotový model, prototyp výrobku pro ověření rozměrů nebo prezentaci a vizualizaci navrhovaného dílu.

Na obrázku 1 je motocykl Jawa Robot před a po renovaci.



Obrázek 1 Jawa Robot před (vlevo) a po (vpravo) renovaci [1]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Hlava válce je součástí, která uzavírá spalovací prostor motoru. Jawa 50, konkrétně typ 23 Mustang disponuje dvoudobým, jednoválcovým, vzduchem chlazeným, vodorovně uloženým, zážehovým motorem o objemu 50 cm<sup>3</sup>. Protože je motor dvoudobý, nenalezneme v jeho hlavě žádné prvky pro ventilové rozvody, jako jsou u čtyřdobých motorů. Je zde pouze spalovací prostor ve tvaru ledvinky, dosedací plocha a otvor se závitem M14x 1,25 pro svíčku. Chlazení vzduchem obstarává několik chladících žeber kolem hlavy, které mají za úkol odvádět teplo od motoru. Celou hlavou procházejí čtyři průchozí otvory pro uchycení hlavy k válci motoru pomocí svorníků. Hlava je na obrázku 2. [2]



Obrázek 2 hlava válce Jawy 50

### 1.1 Výrobní možnosti

V dnešní době existuje mnoho technologií, které by dokázali vyrobit výše uvedenou součást. Po úpravě některých konstrukčních prvků jako jsou vnější úkopy a rádiusy by bylo možné hlavu vyrobit třískovým obráběním na obráběcím CNC centru, tato varianta by vyžadovala speciální nástroje, což by výrazně zvyšovalo výrobní náklady a povrch součásti by obsahoval stopy po obrábění.

Původní díly motorových hlav byly odlévány a proto je vhodnější variantou součást odlít. A zde přichází v úvahu řada možností.

Tlakové lití do kovových forem přináší velmi rychlé výrobní časy, přesné rozměry, jedná se o trvalé formy pro opakované použití, tudíž odpadá práce s modelovým zařízením. Nevýhodou této technologie pro tuto práci jsou vysoké náklady na celé zařízení. V případě sériové výroby, by tato metoda byla jednou z nejvhodnějších, kvůli své vysoké produktivitě. [3]

Gravitační lití do písku je jedna z nejstarších slévárenských metod. Pro konkrétní řešení by bylo velmi obtížné vyjmout model bez poškození vyráběné formy. Dále je nutné zhotovit model, ale výroba modelového zařízení konvenčními metodami, by byla velmi drahá, vzhledem k výrobě jednoho nebo malého počtu kusů. Zde přichází v úvahu možnost 3D tisku a model zhotovit pomocí 3D tiskárny, nicméně problém vyjímání modelu z formy zde stále setrvává.

Lze využít i technologie vypařitelného, nebo vytavitelného modelu. Obě tyto metody jsou vhodné pro výrobu přesných součástí se složitými tvary. Pro výrobu modelů pro tyto technologie se používají matečné formy, ve kterých se modely zhotovují. Pro velké série a složité tvary se využívají kovové matečné formy, jejichž výroba je drahá a náročná.

Pro výrobu prototypů, nebo malých sérií lze modely vyrobit aditivními technologiemi. Pomocí 3D tisku lze zhotovit přímo modely a odpadá tak výroba matečné formy. Toto řešení sníží výrobní náklady a v některých případech i výrobní časy.

## 2 METODY LITÍ S VYTAVITELNÝM A VYPAŘITELNÝM

### 2.1 Vytavitelný model

Lití na vytavitelný model, známé i jako metoda ztraceného vosku se v dnešní době už řadí mezi běžně používané metody pro výrobu přesných odlitek. Princip této metody byl použit již ve starověku například pro výrobu bronzových šperků. Dnes je tato technologie používána pro tvarově i rozměrově přesné odlitky. Odlitky vyrobeny litím na vytavitelný model vyžadují jen minimum dokončujících operací, díky tomu se jedná o efektivní a ekonomickou formu výroby. Obecně se touto metodou vyrábějí spíše menší odlitky. [4] [5] [6]

#### 2.1.1 Postup výroby

V prvním kroku je nutné zhotovit voskový model. Ten se nejčastěji zhotovuje vstříkáním tekutého vosku do matečné kovové formy. V případě menších modelů lze tyto modely po stabilizaci skládat na společný lící kůl, čímž vzniká takzvaný stromeček, stromeček je možné vidět na obrázku 3. [5] [6] [7]

Ve druhém kroku se stromeček namáčí do keramické břechky, jako na obrázku 4. Předtím je možné stromeček opláchnout v lihu pro odstranění nečistot na povrchu a lepší přilnavost keramiky na vosku. Břечka je složena z pojiva, alkosoly nebo hydrosoly, a z plniva, kterým je  $\text{SiO}_2$ , molochit nebo korund případně jiný přírodní či umělý žáruvzdorný



Obrázek 3 stromeček z voskových modelů [8]



Obrázek 5 namáčení do keramické břechky [8]

materiál. Po namočení je nutné nechat stromeček okapat a potom se posype ostřivem. Následně se nechá skořepinová forma vysušit přibližně 2 až 4 hodiny na vzduchu. Proces namáčení, posypu a sušení se několikrát opakuje podle velikosti a složitosti odlitku. S přibývajícimi vrstvami se postupně zvyšuje zrnitost ostřiva. [5] [6] [7]

V dalším kroku se vytavováním dostává vosk ven ze skořepinové formy. Existuje více metod vytavování. Tyto metody je možné rozdělit na metody za vysoké a nízké teploty. Za vysoké teploty se voskový model vytavuje v peci za minimální teploty  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za nízké teploty lze vosk vytavit v horké vodě, v autoklávu, proudem horkého vzduchu nebo dielektrickým ohřevem.

V autoklávu se vosk vytavuje pomocí páry o teplotě zhruba  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  (dle zdrojů rozsah  $120$  až  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a zvýšeném tlaku, autokláv na obrázku 5. Problémem při vytavování je větší tepelná roztažnost vosku než roztažnost skořepiny. Aby nedošlo k poškození skořepiny, je nutné vytvoření dilatační spáry mezi modelem a formou. Dále je využito takzvaného tepelného šoku, rychlého ohřevu, kdy vosk vyteče dřívě, než se stihne poškodit skořepina. Vytavený



Obrázek 4 autokláv [9]

wosk lze po regeneraci znovu použít například pro výrobu vtokových kúlů a dalších částí modelového zařízení, kde není takový důraz na přesnost. [5] [6] [7]

V následujícím bodě je skořepina formy žíhána. Žíhání na obrázku 6. Smyslem žíhání je vytvoření krystalické struktury skořepiny, odstranění případných zbytků vosku a předežhání skořepiny pro lití. Teplota žíhání je pro křemenné formy 900 až 1000°C, pro molochitové a korundové 1200 až 1400°C. Ohřev v žíhací peci je prováděn postupně. [5] [6] [7]

Po vyžhání formy je možné přistoupit k samotnému odlévání. Odlévání může probíhat buď na vzduchu, nebo ve vakuu. Vakuum se volí v případě, jsou-li vysoké požadavky na kvalitu odlévaného materiálu. Předežháním skořepiny je snížena možnost prasknutí formy a také umožňuje odlít odlitků s velmi tenkými stěnami. Skořepinu je možné pro odlévání zasypat ve formovacích rámech pískem, díky čemuž je forma stabilní a je zvýšena bezpečnost práce. Odlévání do skořepinových forem je na obrázku 7. [5] [6] [7]



Obrázek 6 žíhání skořepin [10]



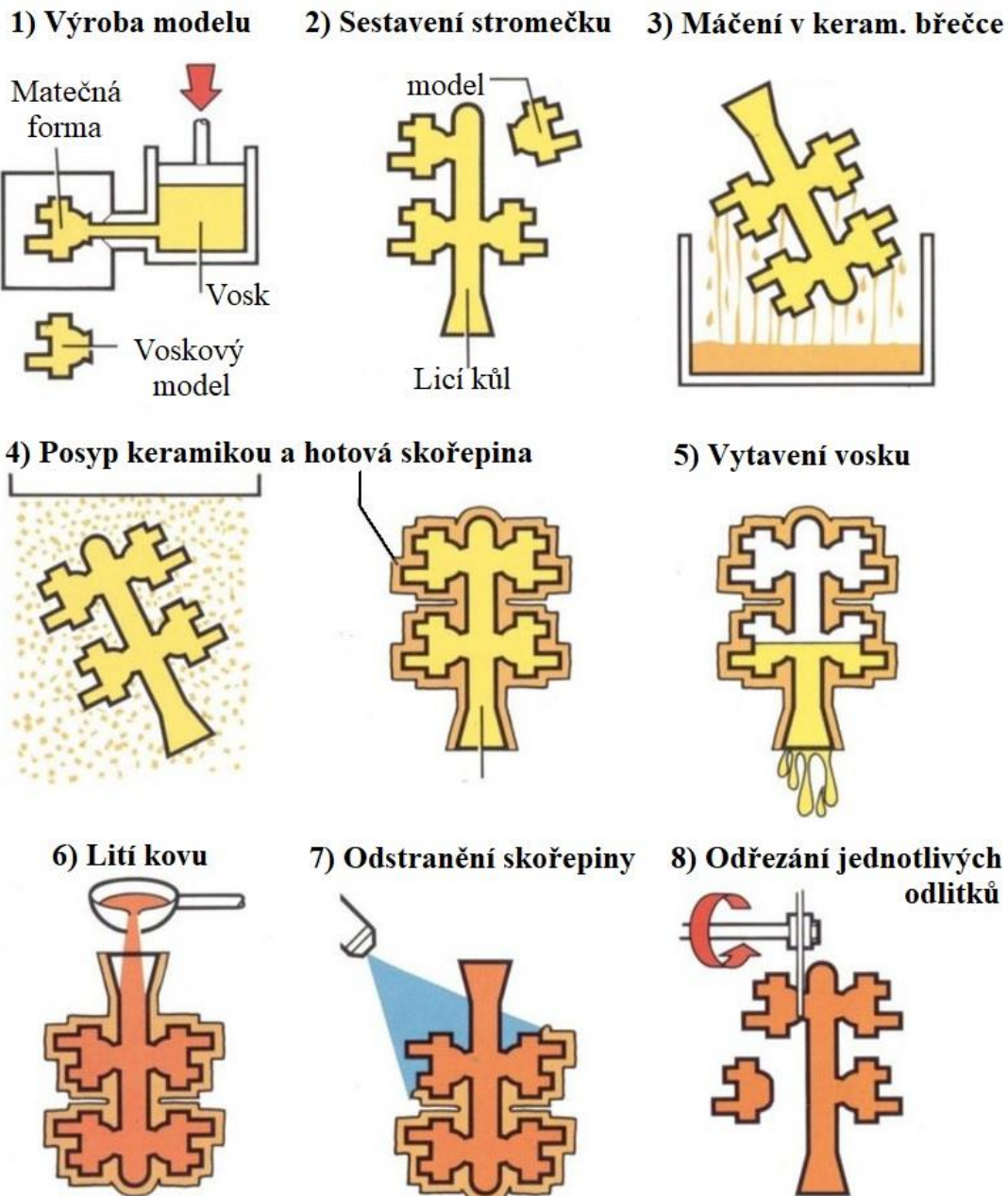
Obrázek 7 odlévání do skořepin [10]

Když forma zchladne, přistoupí se k hrubému oddělení keramického obalu, toho se nejčastěji dosáhne mechanicky například působením vibrací na vibračním stroji nebo pomocí vibračního kladiva. Následuje oddělení odlitků od vtokového systému řezáním. Pro odstranění zbylé keramiky je možné použít mechanické nebo chemické metody. Mezi mechanické metody patří tryskání odlitku, kdy je odlitek tryskán silným tlakem proudu vody nebo abrazivem jako ocelové broky, písek nebo keramická drť, vrhaným lopatkovým kolem. [6] [7]

K chemickému čištění odlitku se většinou používají žíravé soli nebo soli v roztavené formě jako vodní roztok. Lze použít i fluorovodíkové kyseliny. [6] [7]

Následně jsou zabroušeny pozůstatky po odstraňování licí soustavy a provedeny poslední povrchové úpravy a korekce. Nakonec je odlitek zkontrolován. Rozsah kontrolních prací je stanoven podle konkrétních výrobků a jejich účelů. Kontrolovat lze rozměry, geometrickou přesnost, vnitřní a povrchové vady a další vlastnosti. [6] [7]

Proces metody vytavitelného modelu je shrnut na obrázku 8.



Obrázek 8 Lití na vytavitelný model [12]

### 2.1.2 Výhody a nevýhody vytavitelného modelu

Největší výhodou lití na vytavitelný model je možnost výroby formy pro tvarově velmi složité odlitky. Díky tomu, že je model z formy vytaven, odpadají starosti s konstrukcí dělicí roviny, úkosů a rádiusů. [3] [5]

Další výhodou voskového modelu je možnost spojovat menší modely na takzvaný stromeček. Stromeček je spojení více modelů na centrální licí kůl, čímž je možné odlít všechny díly najednou, toto řešení zvyšuje produktivitu a snižuje výrobní náklady a časy.

Další výhodou je rozměrová přesnost, tato metoda se někdy označuje jako přesné lití, díky tomu je možné snížit přídavky na obrábění, nebo je lze v některých případech i vynechat. [3] [5]

V neposlední řadě je nutno zmínit nízkou drsnost povrchu. To rovněž snižuje požadavky na obrábění. [3] [5]

Problémem lití na vytavitelný model je nižší koeficient tepelné roztažnosti keramiky oproti koeficientu voskových směsí. Díky tomuto rozdílu je možná řada příčin poškození keramické formy. Forma může prasknout už i změnou okolní teploty v prostorách, kde se forma nachází po zaformování modelu do keramiky. Tomu lze zabránit udržováním teploty v těchto prostorách. [6]

Další vady mohou vzniknout při chladnutí odlitého kovu, který se smršťuje rychleji než forma, čímž se mohou vytvořit trhliny v odlitku vlivem smršťování kovu. Zde je potřeba aby forma měla odpovídající pevnost. Příliš pevná forma se může porušit při vytavování vosku, měkká forma bude nevhodná pro manipulaci. Během procesu se voskový model smršťuje při jeho výrobě, mění se i rozměry formy při vypalování a kov se také smršťuje při chladnutí. Tyto všechny procesy mohou ovlivnit výslednou rozměrovou přesnost odlitku a s rostoucí velikostí odlitku budou i tyto nepřesnosti narůstat. Do jisté míry těmto problémům lze předcházet výpočtem pro konkrétní materiály, nebo simulačními softwary. [6] [11]

### 2.1.3 Voskové materiály

Voskové modely bývají zhotovené z voskových směsí. Voskové směsi zajišťují lepší vlastnosti modelu oproti použití samotného vosku, jako jsou bod tavení, tvrdost, viskozita, tepelná dilatace. [6]

Na modely se používají směsi vosků neplněných, plněných nebo emulgovaných.

Neplněné vosky jsou sloučeniny více vosků a pryskyřičných komponent. Neplněné vosky mají za pravidla více lesklý povrch. [6]

Do směsi plněných vosků se přidává míchané práškové plnivo (asi 30 %), které se v základním vosku nerozpustí. Plnivo zvýší stabilitu směsi a sníží její kavitaci. V porovnání s emulgovaným voskem je povrch plněných vosků lehce hrubší. [6]

Emulgované vosky jsou materiály se základem podobným neplněným voskům, které jsou emulgovány vodou (7 až 12 %). Povrch modelů z těchto vosků je velmi hladký. [6]

Déle existují vosky na vtoky, které splňují požadavky na pevnost vtokové soustavy, regenerované vosky, ty jsou vyráběny z použitých, vytavených vosků po vyčištění a namíchání nového složení. Adhesní vosky jsou lepivé a využívají se pro spojování různých vosků, například modelu a vtokové soustavy. Opravné vosky pro opravu modelů a utěsnění vtokové soustavy. Vodou rozpustné vosky se používají pro zhotovení vnitřních tvarů v místech, kde nelze použít jiné prostředky. Z těchto vosků se dělají jádra do dutin vstřikovacích forem na výrobu modelu. Po zhotovení modelu se vodou rozpustný vosk rozpustí a vznikne dutina požadovaného tvaru. [6]

Hlavní vlastnosti pro materiály voskových modelů jsou [6]:

- Správná pevnost, tvrdost a stabilita
- Nízká tepelná dilatace
- Dostatečná pružnost pro manipulaci
- Správná viskozita

### 2.1.4 Využití vytavitelného modelu v praxi

Hlavním produktem lití na vytavitelný model jsou odlitky, kde je kladen důraz na přesnost a snaha o minimalizaci následného obrábění, například části proudových motorů (na obrázku 9) jako lopatky a rozváděcí kola. Ale tato metoda zaujímá své místo napříč spoustou oborů a odvětví nejen v průmyslu. Pro příklad lze uvést automobilový průmysl, letectví, energetiku, medicínu a šperkařství. [6] [8]



Obrázek 9 odlitky a voskové modely [8]

### 2.2 Vypařitelný model

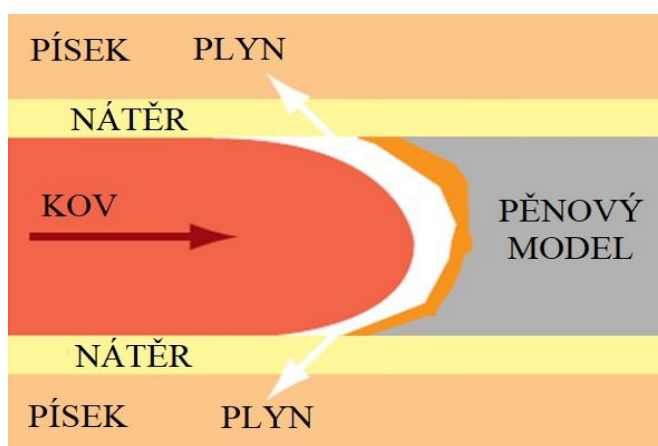
Technologie vypařitelného modelu se zrodila v 50. letech 20. století. V průmyslu byla tato metoda využita v roce 1962 v Německu při výrobě dvanáctitunového odlitku. V roce 1967 byla založena asociace LSM, která spojovala 150 sléváren o celkové výrobě okolo 200 000 tun za rok. [13]

Velké využití této technologie přinesl automobilový průmysl. Metody lití na vytavitelný model se zde využívalo při výrobě lisovacích nástrojů na plechové díly automobilů. Tyto lisovací nástroje byly vyráběny jako kusová výroba a obsahují složité tvary, proto byla metoda vypařitelného modelu pro výrobu těchto dílů ideální. Ukázkou odlitku na vypařitelný model z automobilového průmyslu lze vidět na obrázku 10, kde je polystyrenový model a odlitek bloku motoru. [13]



Obrázek 10 odlitek a model [14]

#### 2.2.1 Princip



Obrázek 11 princip vypařitelného modelu [16]

Technologie lití na vypařitelný model využívá podobně jako lití na vytavitelný model netrvalý model. Hlavní rozdíl mezi metodou s vypařitelným a vytavitelným modelem je, že vypařitelný model není vytavován před odléváním, ale spalován přímo v procesu lití roztaveným kovem. Model bývá nejčastěji zhotoven z polystyrenu. V průběhu lití se model vlivem vysoké teploty roztaveného kovu začne vypařovat. Model se vypařuje tak rychle, že nedochází k přímému kontaktu kov polystyren, ale mezi oběma materiály je plynová mezera. Princip je na obrázku 11. [13] [15]

### 2.2.2 Výhody a nevýhody

Mezi výhody lití na vypařitelný model patří možnost výroby tvarově složitých odlitků bez nutnosti používat jádra. Jedná se o technologii s netrvalým modelem, takže odpadá řešení dělicí roviny, úkosů a vyjímání modelu z formy. Dále je tato metoda považována za přesnou metodu. Cena modelu z EPS činí 20-30% ceny dřevěného modelu, takže pro kusovou výrobu může vypařitelný model znamenat úsporu nákladů. [13] [15] [17]

Velkou nevýhodou je plyn ve formě vzniklý spalováním modelu. Z tohoto důvodu je zde vysoký požadavek na prodyšnost formovacích směsí. Dále tato technologie vyžaduje značné náklady na specifické zařízení pro výrobu modelu. Protože se jedná o technologii s netrvalým modelem, tak pokud se proces nezdaří a odlitek je neopravitelný, je nutné začít znovu od výroby modelu. Za další nevýhodu lze považovat zápach vznikající při spalování modelu. [15]

### 2.2.3 Materiály modelů

Základními požadavky na materiál modelu pro technologii vypařitelného modelu jsou ideální spalitelnost, minimální vznik popela a dobrá obrobiteľnosť. [15]

Nejpoužívanějším materiálem pro vytavitelné modely je bílý expandovaný polystyren (EPS). Dále se využívá modrý expandovaný polystyren, který byl vytvořen speciálně pro tuto metodu lití. Modrý EPS se liší výrazně lepší obrobiteľnosť, lépe se spaluje při odlévání a je dražší. Další materiál plnicí potřebné předpoklady je polymethylmethakrylát (PMMA) tento materiál ovšem vytváří nejvíce plynu v porovnání s ostatními a je také nejdražší, proto je uplatňován jen ve speciálních případech pro litiny. [13] [15]

### 2.2.4 Možnosti výroby modelů

Technologie výroby modelů pro lití na vypařitelný model závisí především na plánovaném počtu vyrobených kusů a požadované přesnosti. Pro velké série je vhodné vypěňování v kovové formě. Zde se smíchají plastové granule s nadouvadlem, které se po zahřátí mění na kuličky. Tyto kuličky se nasypají do formy, kde po dalším zahřátí a stlačení vyplní celý formovací prostor formy. Po vyjmutí z formy vzniká hotový model. Tato metoda vyžaduje velké finanční nároky na zařízení, ale pro velké série se jedná o nejrychlejší metodu, která se snadno automatizuje. Na obrázku 12 nahoře polystyrenový díl ve vypěňovací formě. [13] [16]

Pro menší série, kde není kladen velký důraz na přesnost, lze využít ruční výrobu modelů. Zde se využívá vyřezávání tvarů z jednotlivých bloků polystyrenu, které se následně skládají a lepí do většího celku. Pro řezání se používají rezačky s horkým drátem a ruční horké nože. Při výběru lepidla je důležité, aby se z něj při spalování uvolňoval malý objem plynu, rychle tuhlo a zajistilo požadovanou pevnost dílů pro následnou manipulaci. Tato metoda je nejlevnější, ale má nejnižší přesnost a zabere nejvíce času. Na obrázku 12 uprostřed skládání polystyrenového modelu. [13] [16]



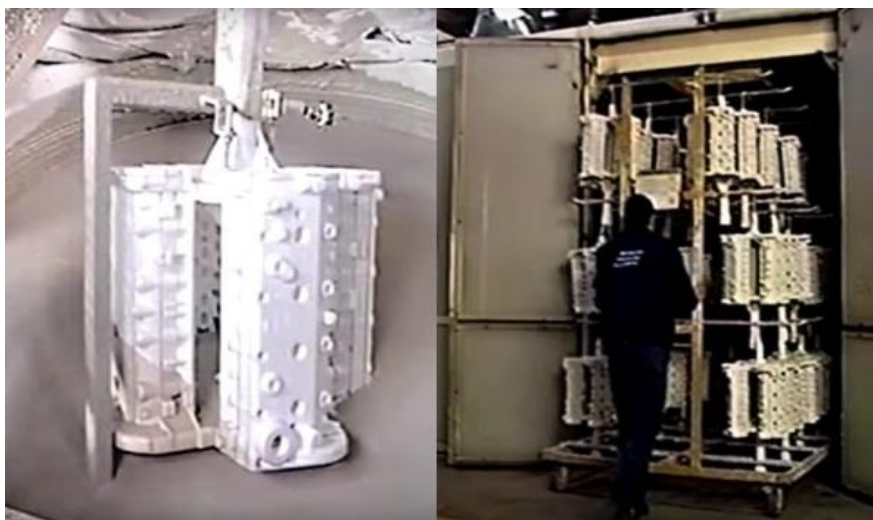
Obrázek 12 možnosti výroby EPS modelů [18] [19]



Za střední cestu lze považovat výrobu modelů pomocí CNC obrábění. Jako i v jiných odvětvích zde může CNC obrábění přinést zvýšení přesnosti a produktivity. Pro obrábění je nutné použít speciální nástroje na polystyren. Tato metoda může být rychlejší a méně náročná na kvalifikaci obsluhy než ruční výroba, ale proces vypěňování je stále rychlejší. Na obrázku 12 dole výroba modelu na CNC stroji. [13] [16]

### 2.2.5 Nátěry modelů

V technologii vypařitelného modelu se nanáší nátěr přímo na polystyrenový model (obrázek 13). Nátěr zabraňuje penetraci kovu do pískové formy a napomáhá kvalitnímu povrchu obrobku. Nátěry bývají na bázi vody, ale častější je lihová báze, která se díky vypařování lihu lépe vysušuje. Je žádoucí pouze tenká vrstva a u nátěru se požaduje prodyšnost, kvůli odvodu plynů při odlévání. Materiály nátěrů jsou kokso-grafitové, ty jsou pouze pro nižší teploty, dále byly speciálně pro spalitelné modely vyvinuty nátěry aluminosilikátové. Pro vysoké teploty se používají zirkonové nátěry. Po natření je nutné model vysušit. Sušení probíhá teplým vzduchem o maximální teplotě 60°C (obrázek 13), při vyšší teplotě by došlo k poškození modelu. Proces vysoušení trvá přibližně 1 až 5 hodin. [13] [15] [20]



Obrázek 13 nanášení nátěru a sušení modelů

### 2.2.5 Postup výroby Lost foam

Tato metoda je určena spíše pro sériovou a lze ji automatizovat do výrobních linek.

Model bývá nejčastěji z polystyrenu. Pro velké série bývají modely vyráběny vypěňováním v kovových formách. Forma se naplní granulemi plastu a nadouvadla, granule se po zahřátí rozpínají, vyplní prostor formy a spojí se do požadovaného tvaru. Menší díly lze lepit do stromečků obdobně jako u vytavitelného modelu. Na polystyrenový model se nanese tenká vrstva nátěru, která vytváří lepší povrch výsledné součásti a zabraňuje penetraci kovu do formy. Po natření je nutné nechat model vysušit. Pro sušení se používá teplý vzduch. [13] [15]

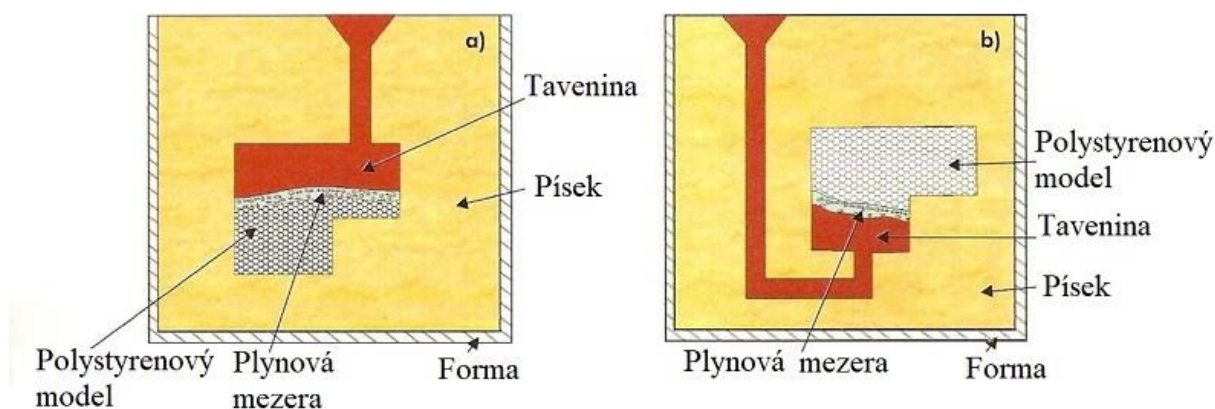
Pokud je model hotový, může se přistoupit k formování (obrázek 14). Hotový model se vloží do formy, pokud ještě není zhotovena vtoková soustava,



Obrázek 14 formování stromečku pro Lost foam [22]

tak se dotvoří. Rám s modelem se vyplní pískem a následně se model zaformuje střásáním a vibracemi. Při výrobě menších součástí ze stejné slitiny lze do rámu složit více odlitků, které se odlíjí najednou a zvýší se tím efektivita výroby. [13] [15]

Při odlévání teplo od blížícího se kovu začíná odpařovat model. Mezi kovem a modelem vzniká plynová kapsa a nemělo by dojít ke kontaktu kovu a modelu. Rychlost odlévání je co nejvyšší a lící teplota je větší než u běžného lití. U gravitačního lití jsou dvě základní možnosti vtokových soustav, shora a se spodním vtokem, obě metody jsou na obrázku 15. Dále lze použít odlévání nízkotlaké, nebo do skořepin. Lití shora přináší jednodušší odvod plynu, který může unikat vtokovou soustavou. A lití se spodním vtokem, kde je odvod plynů horší, protože může unikat pouze prodyšným nátěrem. Výhodou spodního vtoku je rychlejší formování. Po zchladnutí je možné formu rozebrat a vyjmout odlitek. [13] [15] [20]



Obrázek 15 horní a spodní vtok [20]

## 2.2.6 Postup výroby Full mould

Metoda Full mould je určena pro kusovou výrobu, kde se touto technologií vyrábějí i rozměrné odlitky. [13] [15]

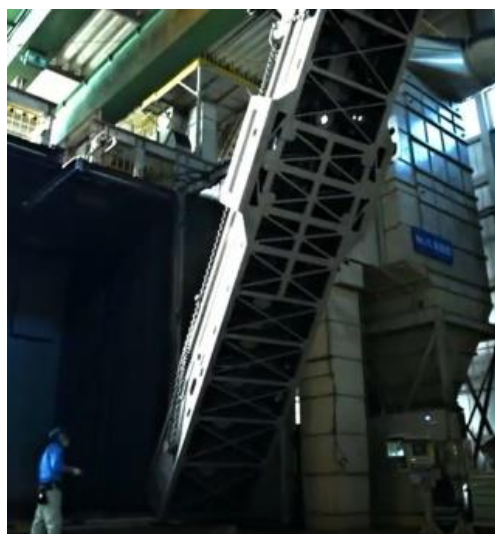
Princip této metody je velmi podobný metodě Lost foam, ale je uzpůsobena kusové výrobě. Modely jsou zde nejčastěji opět z expandovaného polystyrenu a zhotovují se převážně z vyřezaných bloků ručně nebo pomocí CNC technologie. U složitějších odlitků je možné složit model z více slepených částí. Následně je opět potřeba na model nanést nátěr. [13] [15]

Hotový model se vloží do formovacího rámu a zasype formovací směsí. Rozdíl oproti Lost foam je v použití pojivové formovací směsi. [13] [15] [19]

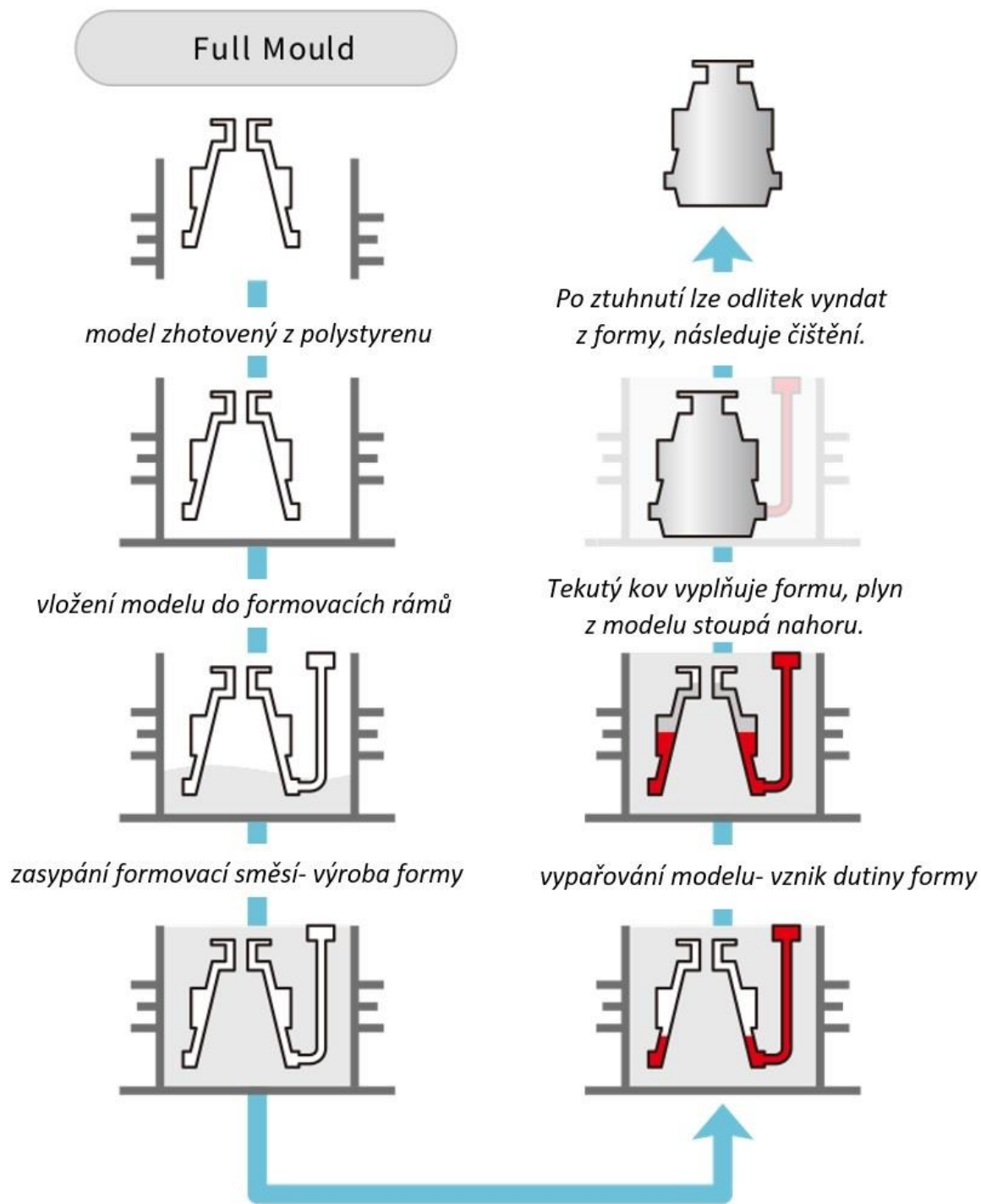
Formovací rám s modelem se přesune na lící pole a může následovat odlévání. Princip je stejný jako u Lost foam, kdy se model vypařuje vlivem tepla roztaveného kovu a vytváří tak dutinu formy. [13] [15]

Po zchladnutí, rozbití formy, odstranění vtokové soustavy a kontrole vzniká hotový odlitek. [13] [15]

Na obrázku 16 lze vidět rozměrný odlitek vyrobený metodou Full mould, pro porovnání velikostí je v levém dolním rohu pracovník. Proces metody Full mould je shrnut na obrázku 17. [19]



Obrázek 16 rozměrný odlitek metody Full mould [19]

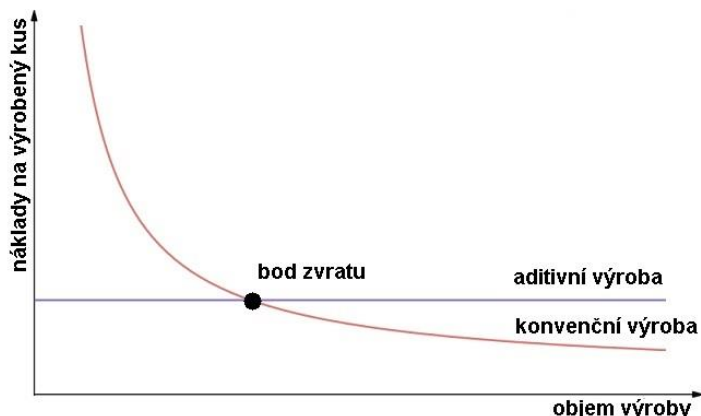


Obrázek 17 Full mould proces [19]

### 3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VE SLÉVÁRENSTVÍ

Aditivní technologie neboli technologie 3D tisku dnes zažívají velký rozmach a pomalu se začínají využívat i ve spojení s jinými technologiemi. I díky možnostem výroby takřka všemožné škály tvarů začíná zaujímat své místo i ve slévárenství. V dnešní době lze tisknout z poměrně široké nabídky materiálů od termoplastů, přes pryskyřice, vosk až po kovy a písek. To znamená, že 3D tisk se nemusí využívat jen na pouhou vizualizaci prototypových dílů, ale je možné touto metodou zhotovit například modely, jádra a další části modelového zařízení, nebo je možnost zhotovit přímo pískovou formu. [23]

Největší výhodou, možnost výroby složitých tvarů, už byla zmíněna. Mezi další výhody patří hospodárná výroba malých sérií, úspora materiálu i energie a i když to tak nevypadá, tak i úspora času. V grafu na obrázku 18 je vidět, že náklady na aditivní výrobu jsou v podstatě konstantní, což je výhoda hlavně při kusové výrobě. Dalšími výhodami může být zkrácení inovačních cyklů, dále 3D tisk může šetřit skladovací prostor, nemusejí se skladovat hotové modely, ale pouze počítačová data a výkresová dokumentace. [23]

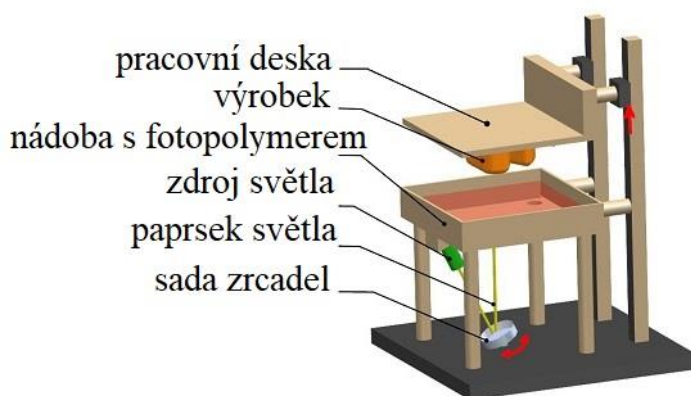


Obrázek 18 porovnání aditivní a konvenční výroby [23]

#### 3.1 3D tisk modelového zařízení pro lití do písku

V modelárnách je nejvíce zastoupen 3D tisk umělých hmot pomocí technologie FDM (Fused Deposition Modeling) hlavně díky dobré dostupnosti potřebného zařízení, dobrým mechanickým vlastnostem modelů a časové stálosti dílů. Dále se využívá technologií PJ (PolyJet) a SLA (Stereolithography), která fungují na principu vytvrzování fotoreaktivní tekuté pryskyřice světlem, schéma na obrázku 19. Tato technologie přináší výborné vlastnosti vytištěného povrchu, kdy je možné model použít bez jakýchkoliv povrchových úprav modelu. [23] [24]

Výhodou 3D tištěných modelů oproti tradičním dřevěným jsou rychlost výroby, nízké nároky na zkušenost obsluhy a samozřejmě jednoduché zhotovení složitých tvarů. Nevýhodou pak může být omezený rozměr tištěných součástí. Tento problém se dá do jisté míry vyřešit skládáním modelů z více částí. V minulosti byla velká nevýhoda 3D tisku pořizovací cena zařízení, to už dnes nemusí být pravda. Převážně malých domácích tiskáren pracujících s technologií FDM je na trhu široká nabídka od mnoha více či méně známých výrobců a jejich cena začíná na celně kancelářského počítače. [23]



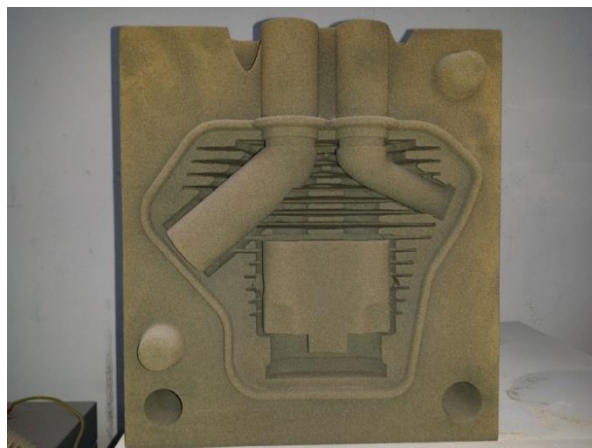
Obrázek 19 technologie SLA [25]

### 3.1.1 3D tisk písku

Technologie Sandprint (3D tisk písku) byla vyvinuta speciálně pro slévárenství. Jedná se o revoluční metodu v oboru, která v podstatě vyřazuje z postupu celý úsek zabývající se modely. Touto metodou se vytváří přímo písková forma z virtuálních CAD dat, takže odpadá výroba modelů, modelových zařízení a samotné formování. Sandprint tak přináší výraznou časovou úsporu a snižuje nepřesnost výroby vzniklou ve vyřazených operacích. [23] [26]

Metoda Sandprint pro tisk forem využívá nejčastěji křemenný písek a jako pojivo furanové nebo fenolové pryskyřice. Na obrázku 20 je forma vytištěná technologií Sandprint. Tisk formy neprobíhá za zvýšených teplot a není moc energeticky náročný. [23] [26]

Výhodami 3D tisku písku je velká časová úspora, odstranění problémů spojených s klasickým formováním do písku, takže odpadá řešení úkosů, odformování a skládání formy. U složitých dílů je možné snížit počet jader nebo jádra přímo zakomponovat do formy. To vše zvyšuje přesnost formy a následně i přesnost odlitku. Díky tomu je možné snížit přídatky na obrábění na funkčních plochách, čímž se snižuje množství litého kovu a následně zkracují obráběcí časy. Vtoková soustava, nálitky a odvětrání formy můžou být zdokonaleny počítačovou simulací a lze je vyrobit libovolně složité. Největší vyráběná tiskárna písku VX4000 od firmy Voxeljet, zobrazená na obrázku 21, má pracovní prostor 4 000 x 2 000 x 1 000 mm, díky čemuž je možné tisknout i velké formy. V případě, že by rozměr formy přesahoval možnosti tiskárny, je možné formu vhodně rozdělit, vytisknout po částech a poté spojit v celek. [23] [26] [27] [28]



Obrázek 20 písková forma vyrobená metodou Sandprint [27]



Obrázek 21 tiskárna Voxeljet VX4000

### 3.1.2 3D tisk jader

Aditivní technologie lze využít i pro tisk jader a jaderníků. Písková jádra lze tisknout obdobně jako pískové formy metodou Sandprint, takto vyrobené jádro je na obrázku 22. Výhodou 3D tisku jader může být snadná výroba jader o složitých tvarech a výroba pro malé série, kde se nevyplácí vyrábět jaderníky konvenčními metodami. [27]



Obrázek 22 vytištěné jádro ve vytištěné formě [27]

### 3.1.3 Böhmerland 21

Velmi pěknou ukázkou využití 3D tisku pískových forem je projekt motocyklu Böhmerland 21 (obrázek 23). Tento motocykl navazuje na slavnou značku Čechie-Böhmerland, kterou založil konstruktér Albin Hugo Liebisch ve 20. letech 20. století. Böhmerland 21 je dílem Petra Knoblocha a jeho firmy 3D Tiskárna. [29]



Obrázek 23 Böhmerland 21 [29]

Prototyp tohoto motocyklu byl představen v roce 2019 a v roce 2020 je plánováno uvedení na trh. Velká část dílu na motocyklu Böhmerland 21 vznikla jako odlitky odlité do pískových forem vytištěných na 3D tiskárně a následně strojně obrobené.

Mezi takto vyrobené díly patří například benzínová nádrž, hliníková kola, ale i většina dílů vlastního 600 cm<sup>3</sup> motoru, který je přepřínovaný kompresorem a chlazený vodou. Forma pro tento motor je vidět na obrázku 20. Je plánovaná výroba jen malé série těchto motocyklů, navíc každý kus si může majitel nechat realizovat podle svých představ, ať už jde o barevnou kombinaci nebo o vlastní nápis na karterech motoru. Z toho je patrné, že se při výrobě Böhmerlandu 21 bude i nadále 3D tisk ve velké míře používat. [29]

### 3.2 3D tisk pro vytavitelné modely

Vytavitelné modely se vyrábějí z materiálů s nízkou teplotou tání. Původní technologie používá voskové modely, které se nejen výborně vytavují, ale mají i skvělý povrch, který není nutný dále upravovat. Tato technologie je oblíbená pro menší, přesné nebo tvarově složité odlitky. Mimo běžné díly, se kterými se ve strojírenství setkáváme, tuto metodu používají i výrobci šperků, kteří tak mohou vyrobit složitý design a jemné detaily. [23]

3D tisk se u vytavitelného modelu dá využít mnoha způsoby a záleží na konkrétním vyráběném dílu a provozu, kde bude výroba probíhat. [23]

První možností je vyrobit model, podle kterého se zhotoví silikonová forma pro výrobu voskových modelů. Tato možnost neklade žádné velké nároky na tištěný model a lze tak využít i základní materiály. Hlavní roli bude při tisku nejspíše hrát cena a doba samotného tisku. Při použití FDM technologie a požadavku na vyšší kvalitu povrchu je vhodné povrch součásti jemně obrousit. [23]

Další možností je vytisknout přímo voskový model, jako je vidět na obrázku 24. Výhodou této technologie, je zachování vosku jako materiálu modelu, přesnost a rychlá výroba pokud se vyrábí malý počet dílů. Nevýhoda spočívá ve velmi vysoké pořizovací ceně zařízení. Tato technologie je vhodná spíše pro menší a drobné odlitky a našla uplatnění například při výrobě šperků nebo v medicíně. [23] [30] [31]

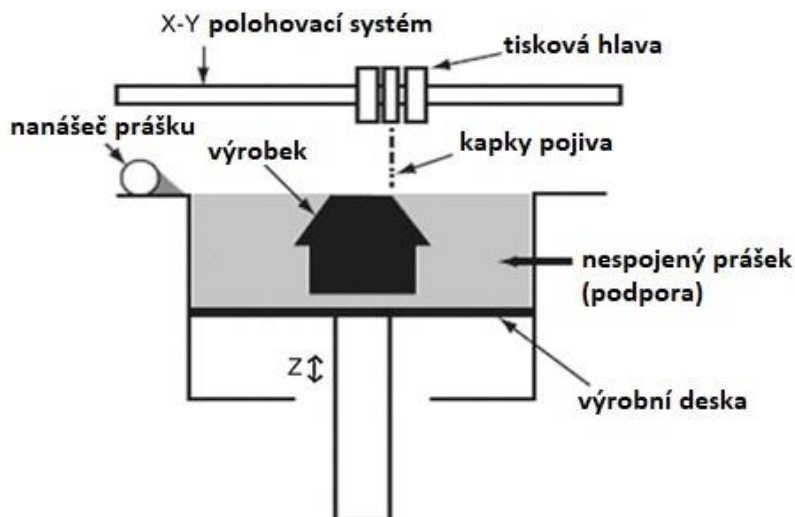


Obrázek 24 voskový model a následný odlitek [30]

### 3.2.1 Tisk nevoskových modelů

Pro tisk nevoskových modelů se v dnešní době nabízí poměrně široká nabídka materiálů. Oblíbeným materiálem je PMMA neboli plexisklo, které má vlastnosti blížíící se voskovým modelům. [23].

Pro tisk plexiskla se používá technologie binder jetting, která spočívá v nanášení tenkých vrstev prášku následně spojovaného pojivem. Schéma této technologie je na obrázku 25. Výhodou binder jetting tisku je vyšší produktivita a větší pracovní prostor zařízení. [23] [32]



Obrázek 25 technologie binder jetting [32]

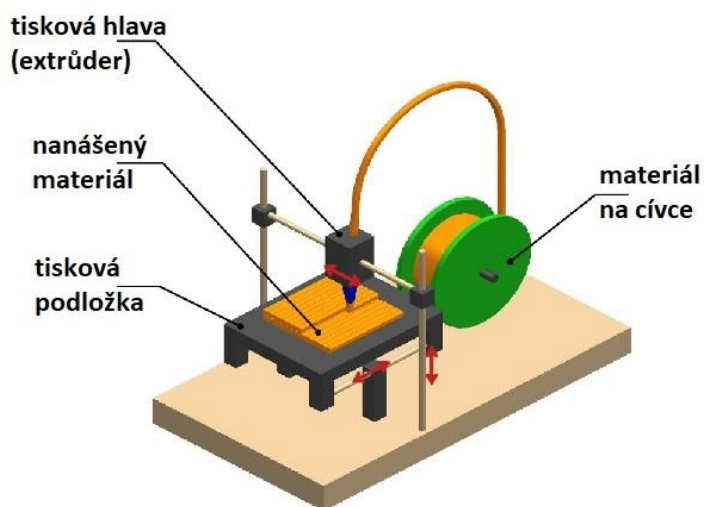
Nebo je pro tisk možné využít FDM technologie, která nanáší tenkou vrstvu roztaveného termoplastu, zobrazeno na obrázku 26. Výhoda FDM spočívá v její popularitě, díky čemuž se v dnešní době jedná o nejlevnější 3D tiskárny na trhu. [23]

Ani jedna z těchto metod nedokáže vyrobit úplně hladký povrch, a tak je vhodné po vytištění povrch modelu lehce obrousit nebo potáhnout tenkou vrstvou vosku. Po té se model spojí s voskovou vtokovou soustavou a zaformuje. Pro vytavení lze zvolit autokláv, kde se vytaví vtoková soustava a většina modelu. [23]

Výhoda PMMA je jeho záporný koeficient tepelné roztažnosti, což znamená, že materiál nezvětšuje svůj objem s narůstající teplotou, a tak se snižuje riziko prasknutí formy při vytavování modelu. Při následném žíhání formy před litím se vypálí zbytky modelu. Pro dokonalé vypálení je doporučeno zvýšit procento kyslíku, aby docházelo k lepšímu spalování a ve skořepině zůstával méně popela. Následně lze skořepinu vyfoukat vzduchem nebo propláchnout vodou a znovu vyžít. [23]

Další variantou je zhotovení výfukových otvorů na formě, které vytvoří tah a do dutiny se dostává více kyslíku pro lepší spalování a odvod spalin. Před odléváním je nutné tyto otvory zaslepit. [23]

Další používaným materiálem pro tisk nevoskových vytavitelných modelů je termoplast ABS. Pro



Obrázek 26 technologie FDM [25]

výrobu modelů z tohoto materiálu se využívá především technologie FDM. Tento materiál se obecně využívá pro výrobu pevných trvalých modelů a součástí napříč všemi obory. Bylo zjištěno, že se dobře spaluje a zanechává jen málo popela. [23] [33]

Pro odstranění modelu ze skořepiny není vhodné použít jako u voskových nebo PMMA modelů autokláv, kvůli tepelné roztažnosti plastu ABS zde hrozí poškození skořepiny. Je doporučeno umístit formu s modelem přímo do žíhací pece vytopené na nejvyšší teplotu, kde se model v krátkém časovém intervalu spálí a neměl by zvětšit svůj objem natolik, aby došlo k poškození formy. Pro minimalizaci vzniku popela je i zde možné obohacovat pecní atmosféru kyslíkem pro dokonalé spalování. [23] [34]

V nedávné době se na trhu objevili speciální odlévací pryskyřice (Castable Resin) pro metodu tisku SLA. Oproti ostatním metodám 3D tisku, se tato metoda vyznačuje dokonalým povrchem součásti, což ve spojení s vytavitelným modelem může vypadat jako ideální alternativa k tradičním voskovým modelům. Tyto pryskyřice se na rozdíl od běžných pryskyřic pro SLA technologii vyznačuje čistým spalováním bez popela a prakticky nulovou expanzí. [35] [36] [37]

Velká nevýhoda této odlévací pryskyřice je její pořizovací cena, která je až několikanásobná oproti běžně využívaným fotopolymerovým pryskyřicím. Další nevýhoda může být malý pracovní prostor SLA 3D tiskáren. To sice nevadí ve šperkařství, pro které je původně odlévací pryskyřice určena, ale při výrobě větších dílů mohou nastat problémy. Použití 3D tisku odlévací pryskyřice lze vidět na obrázku 27. [35] [36] [37] [38]



Obrázek 27 stromeček modelů a odlitků technologie SLA [38]



## 4 VÝROBA ODLITKU HLAVY VÁLCE PRO MOTOCYKL JAWA 50

Pro výrobu odlitku hlavy válce motoru určeného pro renovaci motoru motocyklu Jawa 50 s využitím metod rapid prototyping byla na základě vytvořené literární rešerše zvolena technologie vytavitelného modelu s modelem zhotoveným na 3D tiskárně.

Vzhledem k tomu, že se daný odlitek vyráběl v množství jednoho kusu a není očekávána reprodukce této konkrétní výroby, mohlo se přistoupit k variantě s netrvalým modelem. Tato metoda má umožnit jednodušší a přesnější výrobu složitě tvarovaných odlitků než například standartní gravitační lití do písku s trvalým modelem a dělenou formou.

Varianta gravitačního lití do písku s trvalým modelem by také byla možná, ale obnášela by pravděpodobně dělený model na více částí pro lepší zaformování a následné vyjmutí modelu z formy. Tato varianta by byla složitější na následné obrábění. Nebo by se zde dala použít 3D tištěná jádra z písku, ale to by přinášelo další komplikace, protože školní slévárna nedisponuje 3D tiskárnou zvládající tisk z písku a výroba v externí firmě by byla nákladná.

Metoda vytavitelného modelu se zdá jako nejjednodušší řešení tohoto problému. Vytavitelný model lze vytisknout z materiálu PMMA na běžné stolní 3D tiskárně využívající technologii FDM tisku. Model je možné získat 3D skenováním originální součásti nebo jej lze vytvořit v některém z programů CAD pro parametrické modelování 3D modelů. Zde se nabízí celá řada programů jako třeba Catia, SolidWorks, NX, Freecad, Fusion 360 nebo Autodesk Inventor. Důležitým kritériem je, aby zvolený program umožnil exportovat v něm vytvořený digitální model do formátu vyhovujícímu programu pro ovládání nastavení 3D tiskárny. Pokud by to zvolený program neumožňoval, bylo by nutné pomocí dalšího programu převést digitální model do správného formátu.

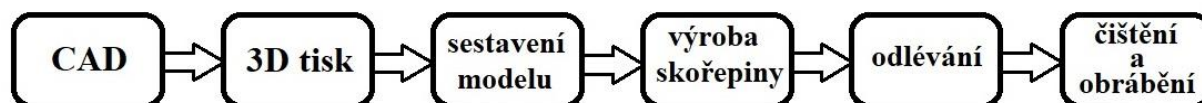
Pro samotný tisk modelu byla zvolena FDM 3D tiskárna a filament z PMMA materiálu, zejména kvůli její dostupnosti. Dalo by se zde využít i jiných technologií tisku, jako například technologie binder jetting, která by zachovala materiál PMMA, ale už se jedná o složitější a hůře dostupnou tiskárnu. Další vhodnou 3D tiskárnou pro tisk modelu by byla tiskárna s technologií SLA a použitím speciální odlévací pryskyřice (Castable Resin), tady je však problém vysoká pořizovací cena speciální pryskyřice a omezený výrobní prostor těchto tiskáren. Běžné materiály pro SLA tisk nelze použít, kvůli jejich chování za tepla. Při zkoušení vytavitelných modelů z běžných pryskyřic ve školní slévárně byly skořepinové formy porušeny rozpínajícím modelem a odlévání tak nebylo možné. Zvolená FDM 3D tiskárna vychází jako nejjednodušší a nejlevnější řešení výroby modelu, důležité kritérium je u této tiskárny velikost pracovního prostoru. Vyráběná součást má přibližné rozměry 125x90x60 mm, součást těchto rozměrů je možné vyrobiť na většině FDM 3D tiskáren na trhu.

Výrobu keramické skořepiny lze provést ručně, máčením modelu na licím kúlu v keramické břečce a následným posypem ostrivem. V tomto případě bylo možné využít stroj Cyclone, který vyrábí skořepinovou formu automatizovaně. Následně je nutné vytavit vosk ze skořepiny a skořepinu vhodně tepelně zpracovat před litím.

U tohoto odlitku je důležitá nekomplikovaná výroba a vybranou slitinu není nutné odlévat v ochranné atmosféře nebo vakuu. Z těchto důvodů může být bez problému použito standartní gravitační lití na vzduchu.

Odlitek bude nutné zbavit vtokové soustavy a očistit od keramické skořepinové formy. Následně je nutné na odlitku obrobít prvky, které nemohli být odlity jako třeba otvory pro svorníky a závit pro svíčku.

Zjednodušené schéma výroby je na obrázku 28.



Obrázek 28 zjednodušené schéma výroby

## 4.1 Modelování v CAD

Pro tvorbu virtuálního modelu byl zvolen program Inventor Professional 2020 od společnosti Autodesk. Tento program spadá do kategorie CAD programů, je to parametrický, adaptivní 3D modelovací software. Inventor umožňuje tvorbu jednotlivých součástí, sestav, ze kterých je následně možné zhotovit výkresovou dokumentaci, dále tento program umožňuje vkládání normovaných dílů z databáze, kooperaci více konstruktérů na jednom projektu, provedení dynamické simulace, pevnostní analýzy a různé animace sestavení. [39]

Tento program byl zvolen kvůli bezplatné školní licenci a zkušenostem s programem. Dále pro tvorbu virtuálního modelu byla potřeba původní hlava motoru motocyklu Jawa 50 a posuvné měřidlo pro zjištění rozměrů.

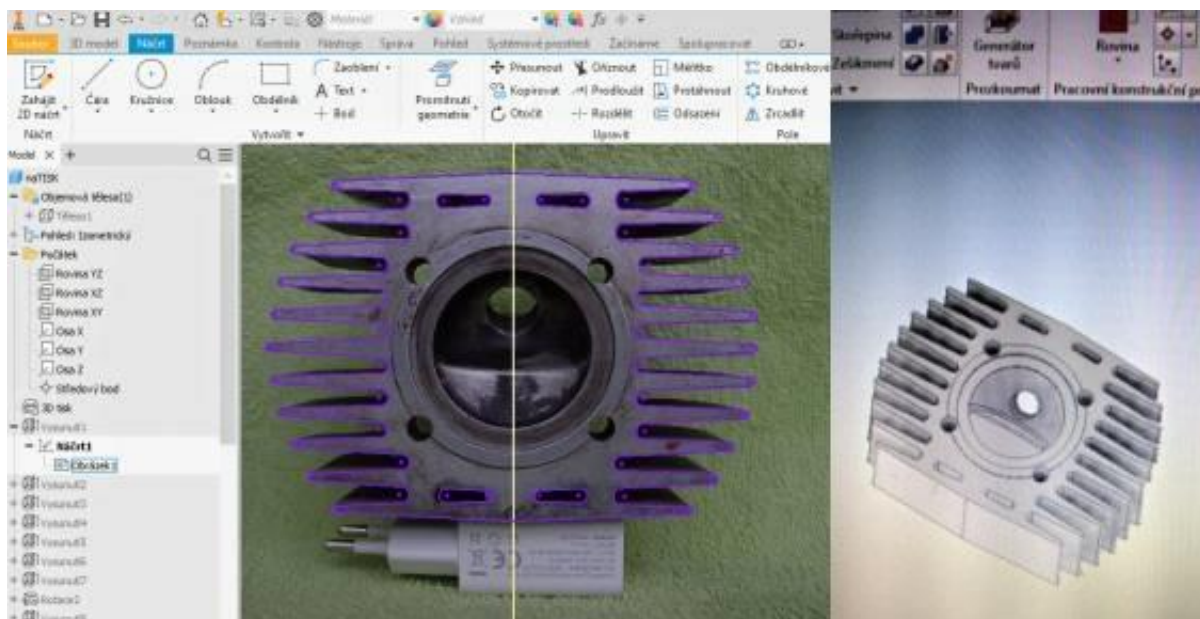
Hlava motoru Jawy 50 je odlitek se spoustou obtížně měřitelných rozměrů. Proto byl vytvořen pokus, na obrázku 29, ve kterém se do programu Inventor vložila fotografie spodní části hlavy, ta byla podle jednoduše změřitelných ploch na těsnící části zmenšena do správného měřítká, aby rozměry odpovídaly skutečným. Spodní kontura chladících žeber byla obkreslena podle fotografie a následně funkcí tažení byl zhotoven základní vnější tvar hlavy.

Vzhledem k tomu, že na funkci chladících žeber nemají mírné geometrické nepřesnosti zásadní vliv, bylo rozhodnuto tento pokus použít pro následnou tvorbu celé digitální verze hlavy motoru.

Následovalo modelování vnitřního spalovacího prostoru. Spalovací prostor byl od začátku výroby motocyklů typu 20, 21 Sport a 23 Mustang v 60. letech 20. století upraven pro zvýšení komprese motoru a změnil tvar z původního tvaru kulového vrchlíku na nový ledvinkovitý tvar, který se modeluje podstatně hůře. [2]

Dalším krokem bylo zhotovení rádiusů a úkosů, které se na odlitku nacházejí na všech vnějších neobrobených plochách. Po dalších drobných úpravách byl zhotoven virtuální model součásti hlavy válce, který je na obrázku 29.

Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto o umístění nálitků, a že se model bude vyrábět bez čtyř otvorů pro svorníky, které by tvořily problém při formování, kdy by do nich formovací směs nezatekla úplně. Tyto otvory byly proto z modelu odstraněny a v místě nálitků byl přidán technologický přídavek na obrobení. Následovala tvorba výkresu a převedení modelu do formátu .stp, který je vhodný pro práci v navazujících programech.

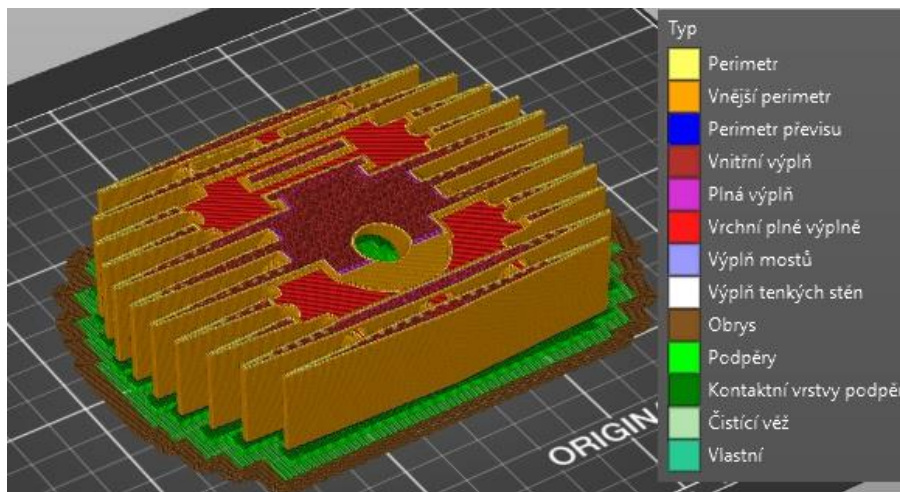


Obrázek 29 náčrt podle fotky a model v programu Inventor

## 4.2 3D tisk modelu

Pro výrobu součásti na 3D tiskárně je nutné získat správná vstupní data pro tiskárnu. Pro získání těchto dat byl použit program PrusaSlicer, na obrázku 30, od společnosti Prusa Research. Tento program je volně dostupný na internetových stránkách společnosti a jeho ovládání je i díky možnosti českého prostředí velmi intuitivní. V programu PrusaSlicer byla nastavena data pro 3D tisk součásti umístění a natočení modelu na pracovním prostoru konkrétního modelu tiskárny, dále parametry a vlastnosti:

- vrstvy
- perimetru
- výplně
- obrysu
- límce
- podpěr
- filamentu
- chlazení
- extruderu



Obrázek 30 řez v programu PrusaSlicer

Tyto data byla nastavena podle doporučení na stránkách společnosti Prusa Research. Dále bylo zvětšeno měřítko modelu o smrštění 1 %. Po zadání všech hodnot byl proveden příkaz „slicovat“, který rozdělí tištěný objekt na jednotlivé vrstvy a připraví základní informace o tisku, jako například spotřebu filamentu a výrobní časy, tyto informace lze vidět v tabulce 1.

Tabulka 1 informace o slicování

Použito filamentu			náklady	Odhadovaný čas tisku	
m	mm <sup>3</sup>	g	Kč	Normální režim	Tichý režim
60,55	145 648,64	180,6	189,63	1d 1h 44m	1d 1h 54m

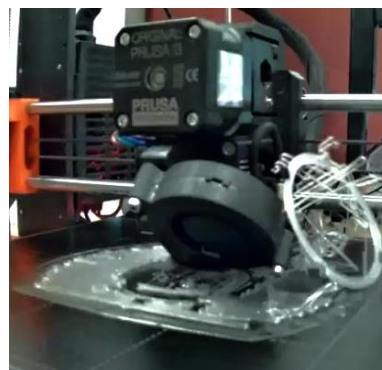
Následně byl vygenerován G-code. G-code jsou všechny parametry nastaveny v programu PrusaSlicer převedeny do formátu čitelného 3D tiskárnou. Podobný G-code se používají například pro řízení CNC obráběcích strojů. Vygenerovaný kód byl přenesen pomocí SD karty do tiskárny.

Pro tisk byla zvolena tiskárna Original Prusa I3 MK3S, která byla dostupná na odboru slévárenství. Tiskárna Original Prusa I3 MK3S používá technologii FDM a jedná se o jednu z nejlépe hodnocených tiskáren na světě ve svém segmentu. [40]

Pro tisk modelu byl na začátku zvolen materiál PMMA od firmy Herz. Materiál PMMA známý jako plexisklo, se ve slévárenství používá na tisk vytavitelných modelů, jeho hlavní výhodou oproti ostatním materiálům je záporný koeficient tepelné roztažnosti, díky čemuž nehrozí poškození skořepiny po zahřátí.

S materiálem PMMA byly provedeny tři pokusy o výtisk modelu, bohužel ani jeden se nepovedl a už v průběhu tisku vznikly chyby, kvůli kterým nebylo možné tisk dokončit. Hlavní

chybou byla přilnavost filamentu na podložku tiskárny, za tuto chybu mohla nejspíš nevhodně nastavené teplota podložky tiskárny nebo extruderu. U dalšího pokusu vzniklo tzv. „špagetové monstrum“ což je chyba, kdy se objekt oddělí od podložky a následně vrstvy na něj nemůžou být nanесeny, tuto vadu lze vidět na obrázku 31. Po vyladění všech podmínek byl nakonec model z materiálu PMMA vyroben. Na modelu vznikly drobné praskliny, které byly opraveny pomocí modrého opravného vosku.



Obrázek 31 vada tisku tzv. „špagetové monstrum“

### 4.3 výroba skořepinové formy

Vytištěný model byl připojen na voskovou vtokovou soustavu se čtyřmi vtoky umístěnými přibližně v místech budoucích otvorů pro svorníky. Dále byl připojen vtokový kůl z tvrdého vosku a licí jamka z lisované keramiky, jak je vidět na obrázku 32. Pro výrobu skořepiny byl zvolen stroj Cyclone od společnosti MK Technologies, kterým disponuje laboratoř LaBUT v prostorách školní slévárny. Tento stroj umožňuje kompletní výrobu skořepinových forem. Cyclone se skládá ze dvou nádrží na keramickou břečku, dvou sprchových posypových komor a sušící komory. Model je mezi jednotlivými stanovišti přesouván robotickým manipulátorem. Cyclone dokáže vyrobit sedmivrstvou skořepinovou formu za 4 hodiny, bez zásahu obsluhy. [41] [42]

Model byl tedy namočen v keramické břečce, poté se nechal okapat a následně posypán ostřivem. Nakonec se model vysuší v sušící komoře. Celý proces se opakuje, dokud model není obalen potřebným počtem vrstev. Pro první cyklus se používá jiná nádrž na břečku a posypová komora. To umožňuje použití jemnějšího materiálu na první obalení, který zajistí pěkný povrch součásti. Použití hrubšího materiálu na další vrstvy má i ekonomický efekt. Vyrobenou skořepinu lze vidět na obrázku 32.

Dalším krokem bylo vytavení voskové vtokové soustavy a PMMA modelu v peci při teplotě 600 °C, skořepiny v peci lze vidět na obrázku 32. Následovalo žihání skořepiny před litím při teplotě okolo 700°C.



Obrázek 32 zleva: model s vtokovou soustavou na stroji Cyclone, vyrobená skořepina, vytavování modelů v peci

## 4.4 odlévání

Pro odlévání repliky byl zvolen materiál, který svými vlastnostmi bude podobný vlastnostem slitiny originálního dílu a bude vhodný pro tento způsob výroby.

Jako vhodné materiály byly vybrány slitiny ČSN 42 4515, ČSN 42 4339 a ČSN 42 4336 vlastnosti viz tabulka 2. Po konzultaci s vedoucím práce byla zvolena slitina 226 podle DIN, která má podobné chemické složení jako ČSN 42 4339. Vlastnosti slitiny 226D podle DIN jsou v tabulce 3.

Tabulka 2 slitiny hliníku [43]

označení dle EN 573-3 a původní ČSN	Rm (MPa)	vlastnosti a použití	třída odpadu
	A (%)		
42 4336 AlSi12NiCuMg	min. 140 A <sub>5</sub> = 0,5	Svařitelnost plamenem a TIG velmi dobrá, el. obloukem dobrá. Slévateľnost velmi dobrá. Obrobiteľnosť zhoršená. Odolnosť proti korozi dobrá. Dobré třecí vlastnosti. Odlitky značně namáhané za vyšších teplot (např. písty spalovacích motorů). Nevhodné pro styk s potravinami.	822
42 4339 AlSi8Cu2Mn	A <sub>10</sub> =250 -	Velmi namáhané a složité odlitky v automobilovém průmyslu (např. bloky motorů, skříně převodovek). Nevhodné pro styk s potravinami.	829
42 4515 AlMg5Si1Mn	min. 120 A <sub>5</sub> ≥ 2	Svařitelnost plamenem a metodou TIG dobrá. Slévateľnost obtížná. Obrobiteľnosť dobrá. Odolává atmosférické korozi. Mechanicky namáhané díly do 250°C (např. žebrované hlavy válců spalovacích motorů). Na součásti přicházející do styku s potravinami.	823

Tabulka 3 vlastnosti slitiny DIN 226D [44]

Všeobecné vlastnosti:					
Univerzální slitina s velmi dobrou slévateľností, zvláště vhodná pro tlakové lití. Malá tendence k vytváření povrchových defektů a ke vzniku vnitřních sraženin při tuhnutí. Dobrá obrobiteľnosť.					
Možnosti využití:					
Slitina pro široké využití. Rovněž pro složité a tenkostěnné odlitky. Zvláště vhodné pro tlakové odlitky s vysokými nároky.					
Licí vlastnosti:					
Interval tuhnutí [°C]	Licí teplota [°C]	Smršťitelnost [%]	Odolnost proti trhlinám za tepla	Tekutost	Pevnost
600-490	650-700	0,5 - 0,8	dobrá	dobrá	dobrá
Mechanické vlastnosti:					
Pevnost v tahu Rm [MPa], min	Mez kluzu Rp <sub>0,2</sub> [MPa], min.	Mezní protažení A50 [%], min.	Tvrdość dle Brinella [HBS], min.		
240	140	<1	80		
Mechanické a fyzikální vlastnosti:					
hustota kg.dm <sup>-3</sup>	pevnost	obrobiteľnosť	svařitelnost	Odolnost proti korozi	
2,75	dobrá	dobrá	špatná	špatná	

Vyžíhaná skořepinová forma byla umístěna na licí pole do formovacího rámu. Následně byla zasypana pískem. Díky zasypaní získala skořepina stabilitu při následném lití, dále písek zpomalil chladnutí materiálu, který tak mohl lépe zatéct do tenkých žebor. Další funkcí zasypaní skořepiny pískem je zvýšení bezpečnosti, pokud by došlo k porušení formy a vytečení slitiny, písek by ji měl zadržet nebo zbrzdit.

V elektrické odporové peci byla roztavena slitina hliníku. Kelímek se slitinou byl umístěn do licích vidlic. Rztavená slitina byla nalita do skořepinové formy, jak je vidět na obrázku 33. Aby smrštění slitiny bylo menší, byla roztavena na nižší teplotu.

Během chladnutí vznikl defekt formy v místě nálitku, jinak se skořepina zdála v pořádku.



Obrázek 33 proces odlévání

#### 4.5 čištění a obrábění

Hrubé čištění, rozbití skořepinové formy proběhlo ve slévárně. V prvním kroku byly úderý kladivem na vtok odstraněny vtoky od modelu a narušena keramická skořepina. Na obrázku 34 lze vidět oddělený odlitek ve skořepině od vtoku. Dále byla odstraněna velká část skořepinové formy v prostoru žebor za pomoci úderů kladivem do drátu. Po odstranění většiny skořepinové formy byla hlava tryskána.



Obrázek 34 odlitek oddělený od vtoků

Jemnější čištění probíhalo v domácích podmínkách, takže byly použity jen základní ruční nástroje. Pro odstranění nálitků byl odlitek upnut do svěráku mezi kusy kartónu a nálitky byly uříznuty ruční pilkou na kov. Následně byly zbytky po nálitkách zabroušeny pilníkem a přímou bruskou DWT GS06-27 LV se stopkovými frézami. Proces čištění je vidět na obrázku 35.

Pro jemnější odstranění zbytků skořepinové formy byla použita aku vrtačka Black & Decker EPC14CAB s vrtákem do betonu o průměru 3 mm pro narušení zbytků skořepiny a poté byla skořepina oddělována starým plochým šroubovákem. Jako další krok byl použit hřebík a kladivo k opatrnému vysekání zbytků skořepiny z prostorů mezi žebry. Pro lepší záběr byla špička hřebíku zbrúšena do tvaru připomínajícího plochý sekáč nebo dláto. Dále byl pro odstraňování zbytků skořepinové formy použit gravírovací přístroj Parkside, který poměrně pěkně zbavoval odlitek zbytků keramiky, ale kvůli své konstrukci se dostal pouze do dobře přístupných míst. Postup čištění je vidět na obrázku 35.



Obrázek 35 čištění odlitku, zprava: odstranění, zabroušení vtoků, odstranění zbytků keramiky

Odlít nebylo možné prvky jako otvory pro svorníky a závit pro svíčku. Po odlítí a odstranění nálitků nebyly některé plochy ideální, jako spalovací plocha a těsnící prostor hlavy. Proto bylo nutné tyto části obrobit. Toto obrábění povětšinou vyžaduje složitější nástroje, než nabízela domácí dílna a po vyvrtání děr pro svorníky, které ještě nebyly úplně přesné, byla hlava předána na obrobení v profesionální dílně na opravy motorů.

V dílně byla zavařena bublina na těsnící ploše vzniklá při odlévání. Následovalo soustružení. Zde byla hlava upnuta na lícni desku universálního soustruhu a byly přesoustruženy okraje spalovacího



Obrázek 36 soustružení spodní strany žebër



Obrázek 37 zhotovení závitu

prostoru s těsnící plochou. Následně byla hlava upnuta navíc otočným hrotem s přípravkem pro upínání hlav a byla osoustružena spodní část žebër, lze vidět na obrázku 36.

Další operací bylo zhotovení závitu, které probíhalo na sloupové vrtačce. Hlava byla přišroubována k pomocné desce a deska byla upnuta do úhlového svěráku na pracovním stole vrtačky, na obrázku 37. Následně byl na svěráku nastaven správný úhel. Po upnutí hlavy se mohlo přistoupit k obrábění. Jako první byl zhotoven závit pro svíčku M 14x 1,25 za pomoci strojního závitníku. V následujícím kroku byla orovnána dosedací plocha pro svíčku za pomoci záhlubníku.

Před uvedením hlavy válce do provozu by ještě bylo vhodné zabrousit její dosedací a celou spodní část podle konkrétní vložky konkrétního válce motoru, na kterém by byla tato hlava použita.

## 4.6 Vady a zhodnocení

Bohužel, v celém procesu vznikaly více či méně závažné vady. První vážné problémy se vyskytly při 3D tisku modelu. Na finálním modelu se vyskytly praskliny na žebrech, které byly opraveny voskem. Stopy po těchto prasklinách v podobě podélných vrubů jsou stále patrné na výrobku. Nejviditelnější prasklina vznikla ve spodní části, linie této praskliny je vyznačena červenými tečkami na obrázku 38. Tato prasklina by na první pohled nebyla vidět, protože po montáži by byla ve spodní části. Díky vrubu toto žebro však může být náchylnější na porušení.



Obrázek 38 vady na spodní straně

Další vady vznikly při odlévání, na obrázcích 38, 39, 40, 41 značeny plnou čarou. Tyto vady jsou řeziny v horní části dosedací plochy pro svíčku, bublina na těsnící ploše a části spalovacího prostoru (obrázek 40), nezatečené části žebér, drobné vady na žebrech vzniklé pravděpodobně nedokonalým vytavením modelu, tyto vady připomínají zálupy. Bublínu na těsnící ploše se podařilo opravit zavařením a obrobením.



Obrázek 39 vady na boční straně žebér kolem dosedací plochy pro svíčku

Při obrábění došlo k odlomení drobných částí žebér (obrázek 41) při soustružení jejich spodní strany a otlacení od upínacích čelistí (obrázek 38).

Další a nejzásadnější vada vznikla při vrtání děr pro svorníky, kdy vlivem špatného postupu a naměření jedna díra prochází částí těsnící plochy. Tato vada je opravitelná, ale vyžadovalo by to zavaření této díry a opětovné vyvrtání. Ostatní vady jsou spíše vzhledového charakteru a na funkci součásti nebudou mít zásadní vliv.



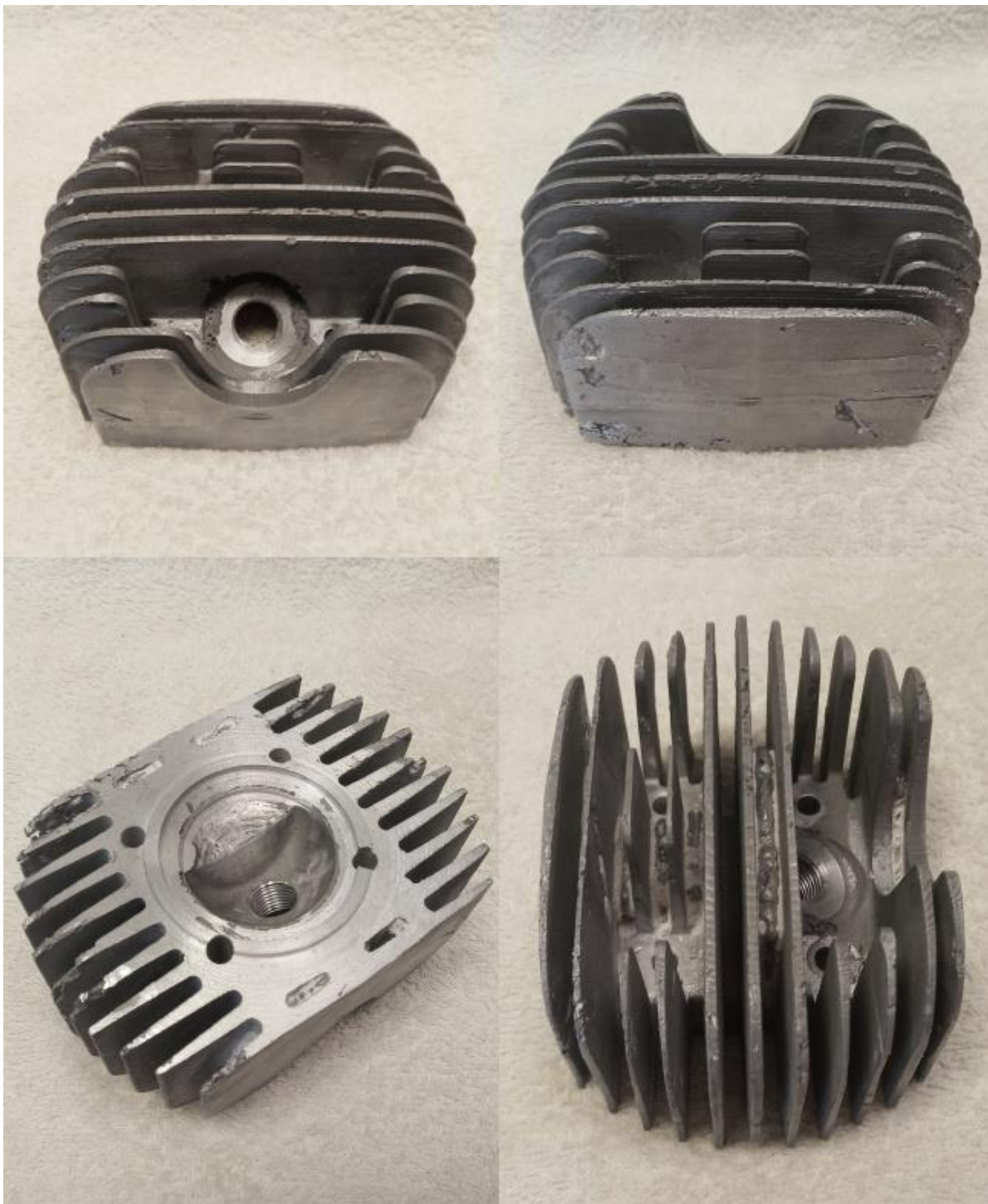
Obrázek 41 vady v okolí spalovacího prostoru  
Obrázek 40 vady na spodní straně žebér



I přes vady procházející celým procesem se tato technologie jeví jako vhodná pro složitější odlitky v kusové výrobě a výrobě prototypových dílů.

Protože vyráběná součást, hlava válce motoru, je určena na renovaci starého motocyklu, musí splňovat funkční i vzhledová kritéria. Po opravení chybného otvoru a zabroušení podle vložky válce konkrétního motoru by hlava měla být funkční. Co se týká vzhledové části, je při bližším pohledu jasné, že se nejedná o originální díl a že má na sobě různé vady.

Hotový obrobek lze vidět na obrázku 42.



Obrázek 42 obrobek hlavy válce pro motocykl Jawa 50

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout technologii odlitku určeného pro renovaci motoru motocyklu s využitím metod rapid prototyping. Na základě navržené technologie součást odlít a provést zhodnocení navržené technologie.

Na základě literární rešerše bylo navrženo použít technologii vytavitelného modelu a pro výrobu modelu využít metodu rapid prototyping, 3D tisk.

Pokud by se podobná práce prováděla v budoucnu znova, tak pro vytvoření virtuálního modelu by bylo vhodné využít 3D skenování. Přímo u této součásti by bylo vhodné v modelu naznačit budoucí místa otvorů pro svorníky přímo na odlitku.

3D tisk materiálu PMMA není zatím úplně odzkoušený pro technologii FDM, proto je potřeba najít optimální podmínky tisku. Možná by mohla pomoci i vyhřívaná pracovní komora, což by mohlo zlepšit kvalitu výsledného modelu a nemusely by vzniknout praskliny na chladících žebrech.

Výroba keramické skořepinové formy na stroji Cyclone proběhla bez problémů a není tady nejspíš nic, co by bylo potřeba do budoucna změnit.

U odlévání nejsem schopen vybrat konkrétní parametry, které stály za vznikem vad. Tyto vady může ovlivňovat například zvolená slitina, lící teplota, vtoková soustava. Je možné, že se model nevytavil úplně a bubliny v horná části odlitku byly způsobeny právě zbytky modelu a plynem vzniklým jeho spálením. Tomuto by mohla částečně zabránit vyšší teplota žíhání skořepiny.

U čištění by pravděpodobně nejvíce ušetřilo práci chemické dočištění, ale vzhledem k nákladům a požadavkům se jedná o složitou činnost, která se pro jeden odlitek nevyplatí.

U obrábění byla největší chyba špatně vyvrtaný otvor pro svorníky, této chybě by se dalo do budoucna zabránit naznačením místa otvorů přímo na odlitku nebo výrobou vrtacího přípravku pro přesné vyvrtání otvorů. Při soustružení byly odlomeny kousky žebere. Protože se jednalo o kousky žebere v místech oslabených vadami na odlitku, tak tomuto problému by zabránil lepší odlitek.

I přes vzniklé vady se tato technologie ukázala jako vhodná. A její funkčnost dokazuje i její využití v praxi některých firem. Konkrétně pro výrobu hlavy válce pro motocykl Jawa 50/23 Mustang je tato výroba zbytečně složitá a neefektivní, protože dnes je na trhu spousta rychle dostupných originálních i replikovaných dílů.

Tato metoda renovace může najít své místo pro výrobu dílů na stroje, pro které již nelze sehnat náhradní díly, jako například staré stroje vyráběné jen v malých sériích, nebo třeba soutěžní speciály.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ARIOCARPUS. *Renovace Jawa Robot*. In: Renovace Jawa Robot [online]. Rajče.net, 2010, [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: [https://ariocarpus.rajce.idnes.cz/Renovace\\_Jawa\\_Robot](https://ariocarpus.rajce.idnes.cz/Renovace_Jawa_Robot)
2. PAVLŮSEK, Alois. *Motocykly Jawa 50-90 cm<sup>3</sup>: historie, technika, prototypy, sport*. 1. Brno: CPress, 2012. Motoalbum (CPress). ISBN 978-80-264-0044-8.
3. HORÁČEK, Milan. *Slévárenská technologie I*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 166 s. ISBN 80-214-0217-2.
4. BEELEY, P.R. *Foundry technology*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, x, 719 s. : il., čb. fot. ; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.
5. HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitek vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno, 2009, , 3-25 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
6. HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha, , 1-29 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>
7. *Odlitek přesného lití* [online]. Kopřivnice: Cirex, 2019 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://cirex.cz/odlitek-presneho-liti/proces/>
8. *Process Basics* [online]. Milford: HITCHINER Manufacturing Co., c2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.hitchiner.com/process-basics>
9. *Dewaxing* [online]. Sihor: Garg Casteel, c2018 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.gargcasteels.com/investment-casting-process/#dewaxing>
10. *Moravia Tech postup výroby* [online]. Brno: Moravia Tech, 2017 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://slevarna.moraviatech.cz/postup-vyroby/>
11. CAMPBELL, J. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.
12. *Lití odlitek met. vytav. modelu* [online]. Uherské Hradiště: Meist, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.mesitfoundry.cz/vyroba-odlitku>
13. PASTYŘÍK, Petr. *Vypařitelný model*. Brno, 2019. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
14. *[Odlitek a model]* [online]. Plymouth: Plymouth foam, 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.plymouthfoam.com/wp-content/uploads/2015/07/lost-foam-casting-mousse-perdue-mouflage-1.jpg>
15. PERNICA, Vítězslav. *Lití na vypařitelný model* [přednáška]. Brno: VUT v Brně, 8. 11. 2019.
16. ZÁDĚRA, Antonín. *Technologie II (5TE): Přednáška č. 2*. In: *Studijní opory* [online]. Brno: Odbor slévárenství FSI VUT v Brně, 2017, 31.8.2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/studium/studijni-opory>
17. *Lost Foam* [online]. Kuźnia Raciborska: RAFAMET, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://zorafamet.pl/cs/nabidka-navrh-ceny/lost-foam>
18. *[vypěňování EPS]* [online]. Pardubice: Hitaplast, c2012 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: [https://www.hitaplast.cz/product\\_imgs/ZrghaQ1hRWyb0.jpg](https://www.hitaplast.cz/product_imgs/ZrghaQ1hRWyb0.jpg)
19. *Full Mold Casting* [online]. Shimizu: Kimura, 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.kimuragr.co.jp/en/fmc/>

20. HORÁČEK, Milan. *Výroba odlitků technologií vypařitelného modelu*. In: *Studijní opory* [online]. Brno: Odbor slévárenství FSI VUT v Brně [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/studium/studijni-opory>
21. *Lost Foam Casting System* [online]. Pianezza: FATA Aluminum, 2016 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=KRW\\_DniO68M](https://www.youtube.com/watch?v=KRW_DniO68M)
22. *The Lost Foam Casting* [online]. Shijiazhuang: 安会娇, 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6fEU3fuQd9s>
23. Slévárenství: *3D tisk* [online]. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2017, 65(3-4) [cit. 2020-06-03]. ISSN 0037-6825. Dostupné z: [https://issuu.com/inasport/docs/slevarenstvi\\_3\\_4\\_2017](https://issuu.com/inasport/docs/slevarenstvi_3_4_2017)
24. *Original Prusa SL1* [online]. Praha: Prusa Research, 2018 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [https://blog.prusaprinters.org/cs/original-prusa-s11-nova-sla-3d-tiskarna\\_33979/](https://blog.prusaprinters.org/cs/original-prusa-s11-nova-sla-3d-tiskarna_33979/)
25. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. Libhošť: dk metal prominent, 2018 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
26. *Unikátní technologie 3D tisku písku*. MM: Monotematická příloha [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015, 03.06.2015, (6) [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-technologie-3d-tisku-pisku.html>
27. KNOBLOCH, Petr. *3D tiskárna Turnov*. 3dtiskarna.cz [online]. Trutnov: Petr Knobloch [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.3dtiskarna.cz/3d-tisk/>
28. *Voxeljet vx4000* [online]. Friedberg: Voxeljet [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/vx4000/>
29. *Bohmerland 21* [online]. Trutnov: Peter Knobloch, 2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.bohmerland.cz/cz/o-projektu/kdo-za-tim-stoji/>
30. *3D tiskárna ProJet MJP 2500W* [online]. Praha: abc3D, 2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/eshop/3d-tiskarny/3d-tiskarna-projet-mjp-2500w-detail>
31. BUK, Václav a Karel HEINIGE. *Solidscape T76 Benchtop – 3D tiskárna pro puntičkáře*. In: *Cad.cz* [online]. Brno: CCB, c2009-2020 [cit. 2020-06-03]. ISSN 1802-6168. Dostupné z: <https://www.cad.cz/hardware/78-hardware/1532-solidscape-t76-benchtop-3d-tiskarna-pro-puntickare.html>
32. GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Binder Jetting*. In: *Additive Manufacturing Technologies* [online]. New York: Springer, 2015, 2015, s. 205-218 [cit. 2020-06-03]. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_8). ISBN 978-1-4939-2113-3. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-2113-3\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-2113-3_8)
33. *Přehled dostupných materiálů* [online]. Valašské Meziříčí: na3D [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
34. *Materiálový list ABS*. In: *AK plast* [online]. Ledec nad Sázavou: AK plast [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/ABS\\_mat\\_list.pdf](http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/ABS_mat_list.pdf)
35. *Materiály pro SLA tisk a její vlastnosti* [online]. Uherský brod: pb-com, c2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.pb-com.cz/soubor.php?id=23%20---materialy%20SLA>
36. *Photocentric UV CASTABLE* [online]. Brno: Solidify 3D, c2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/photocentric-lc-precision-1-5/uv-resin-odlevateln-y-photocentric-cerveny-1-kg-pro-photocentric-lc-precision-1-5-2/>
37. *Formlabs Form 2 Castable* [online]. Svitavy: NetAction [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.flava.cz/index.php?n=&go=shop&id=2987&cat=976&cat1=976>

38. *Blucast Original Formlabs Castable Resin 3DHUBgr*. In: 3dhub: Bluecast LCD Formlabs Castable Resin 3DHUBgr 12 [online]. Pireus: 3dhub, 2017, 2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [https://www.3dhub.gr/?attachment\\_id=4187](https://www.3dhub.gr/?attachment_id=4187)
39. *Inventor* [online]. San Rafael: Autodesk, c2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/features?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
40. *PRUSA I3 MK3S* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>
41. *Slévárna* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, ÚST odbor slévárenství, [2018] [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/vyzkum/slevarna>
42. *MK Cyclone* [online]. Kuřim: MCAE Systems, 2016 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/mk-cyclone-nova-technologie-pro-vyrobu-skorepinove-formy-od-mcae-systems-sro/c/3809/>
43. ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky 2: pro školu a praxi*. 1. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
44. *DIN Slitina 226D* [online]. Dobříš: Trimet, 2006 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: [http://www.trimet.cz/cz/sv\\_EN\\_AB-46000.php](http://www.trimet.cz/cz/sv_EN_AB-46000.php)
45. *Citace pro* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D	Trojrozměrný
CAD	Computer aided drawing
CNC	Computer numeric control
EPS	Expandovaný polystyren
FDM	Fused deposition modeling
PMMA	Polymethylmethakrylát
SD	Secure Digital
SLA	Stereolithography
TIG	Tungsten inert gas

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Jawa Robot před (vlevo) a po (vpravo) renovaci [1] .....	9
Obrázek 2 hlava válce Jawy 50 .....	10
Obrázek 3 stromeček z voskových modelů [8] .....	11
Obrázek 4 autokláv [9] .....	11
Obrázek 5 namáčení do keramické břechky [8] .....	11
Obrázek 6 žihání skořepin [10] .....	12
Obrázek 7 odlévání do skořepin [10] .....	12
Obrázek 8 Lití na vytavitelný model [12] .....	13
Obrázek 9 odlitky a voskové modely [8] .....	15
Obrázek 10 odlitek a model [14] .....	15
Obrázek 11 princip vypařitelného modelu [16] .....	15
Obrázek 12 možnosti výroby EPS modelů [18] [19] .....	16
Obrázek 13 nanášení nátěru a sušení modelů .....	17
Obrázek 14 formování stromečku pro Lost foam [22] .....	17
Obrázek 15 horní a spodní vtok [20] .....	18
Obrázek 16 rozměrný odlitek metody Full mould [19] .....	18
Obrázek 17 Full mould proces [19] .....	19
Obrázek 18 porovnání aditivní a konvenční výroby [23] .....	20
Obrázek 19 technologie SLA [25] .....	20
Obrázek 20 písková forma vyrobená metodou Sandprint [27] .....	21
Obrázek 21 tiskárna Voxeljet VX4000 .....	21
Obrázek 22 vytištěné jádro ve vytištěné formě [27] .....	21
Obrázek 23 Böhmerland 21 [29] .....	22
Obrázek 24 voskový model a následný odlitek [30] .....	22
Obrázek 25 technologie binder jetting [32] .....	23
Obrázek 26 technologie FDM [25] .....	23
Obrázek 27 stromeček modelů a odlitků technologie SLA [38] .....	24
Obrázek 28 zjednodušené schéma výroby .....	25
Obrázek 29 náčrt podle fotky a model v programu Inventor .....	26
Obrázek 30 řez v programu PrusaSlicer .....	27
Obrázek 31 vada tisku tzv. „špagetové monstrum“ .....	28
Obrázek 32 zleva: model s vtokovou soustavou na stroji Cyclone, vyrobená skořepina, vytavování modelů v peci .....	28
Obrázek 33 proces odlévání .....	30
Obrázek 34 odlitek oddělený od vtoků .....	30
Obrázek 35 čištění odlitku, zprava: odstranění, zabroušení vtoků, odstranění zbytků keramiky .....	30
Obrázek 36 soustružení spodní strany žeber .....	31
Obrázek 37 zhotovení závitu .....	31
Obrázek 38 vady na spodní straně .....	31
Obrázek 39 vady na boční straně žeber kolem dosedací plochy pro svíčku .....	32
Obrázek 40 vady v okolí spalovacího prostoru .....	32
Obrázek 41 vady na spodní straně žeber .....	32
Obrázek 42 obrobený odlitek hlavy válce pro motocykl Jawa 50 .....	33

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 informace o slicování .....	27
Tabulka 2 slitiny hliníku [43].....	29
Tabulka 3 vlastnosti slitiny DIN 226D [44].....	29



## SEZNAM VÝKRESŮ

Hlava válce	BP-01-2020
Model	BP-02-2020