



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SOUČASNÉ TRENDY VE VÝROBĚ TRVALÝCH MODELŮ

ACTUAL TRENDS IN MANUFACTURE OF PERMANENT PATTERNS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ BENDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Benda

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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:

Současné trendy ve výrobě trvalých modelů

v anglickém jazyce:

Actual trends in manufacture of permanent patterns

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti existuje mnoho metod výroby trvalých modelů včetně metod používajících technologie RP. Úkolem této rešerše je shromáždění a přehledné seřazení nejmodernějších směrů a trendů v této oblasti.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování rešerše o nejmodernějších směrech a trendech v oblasti zhotovení trvalých modelů sloužících k výrobě slévárenských forem.

Seznam odborné literatury:

1. CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. 288 p. ISBN 0-7506-4790-6.
2. Fundamentals of Foundry Technology. Edited by PD Webster. Redhill: Portcullis Press, 1980. ISBN 0 86108 078 5.
3. SCHLEG, F.-P. Technology of Metalcasting. Des Plaines: AFS, 2003. 351 p. ISBN 0-87433-257-5.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

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

V Brně, dne 21.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvoření přehledu jednotlivých metod pro výrobu trvalých modelů. Podle druhu materiálů jsou modely rozděleny na dřevěné, kovové, plastové a modely vyrobené z pryskyřice. Dále jsou zde popsány určité metody rychlého prototypování. Celá práce je doplněná obrazovou dokumentací.

Klíčová slova

slévárenství, trvalý model, rychlé prototypování, stereolitografie, selective laser sintering, solid ground curing, direct metal laser sintering, 3D printing

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create an overview of different methods for making permanent models. According to the type of materials the models are divided into the wooden, the metallic, the plastic and the models made from the resin. Further, certain methods Rapid prototyping are described here. The thesis is completed with visual documentation.

Key words

foundry industry, permanent model, Rapid Prototyping, stereolithography, selective laser sintering, solid ground curing, direct metal laser sintering, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BENDA, Tomáš. *Současné trendy ve výrobě trvalých modelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 45 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Současné trendy ve výrobě trvalých modelů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 22. 4. 2013

.....
Tomáš Benda

Poděkování

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

OBSAH

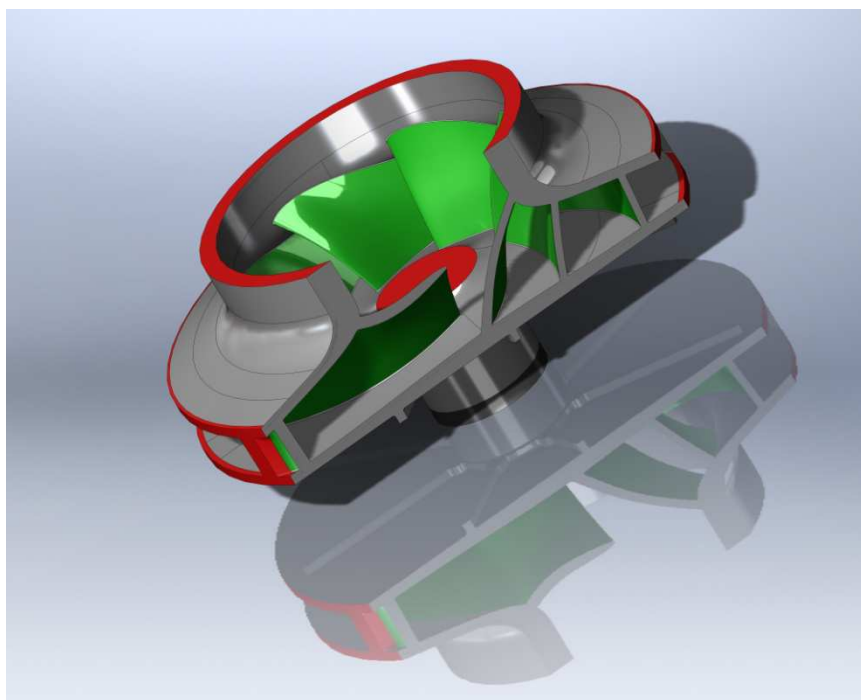
Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	7
1 Požadavky na trvalé modely	8
2 Materiály modelů.....	10
2.1 Dřevo.....	11
2.1.1 Sušení dřeva.....	13
2.1.2 Vlastnosti dřeva	14
2.1.3 Moderní dřevěné materiály	16
2.1.4 Dřevěné modely s kovovými povlaky	16
2.1.5 Stroje pro výrobu dřevěných modelů	18
2.2 Kovy a slitiny	19
2.3 Sádra.....	22
2.4 Plasty a pryže	23
2.4.1 Reaktoplasty	24
2.4.2 Termoplasty.....	25
3 Metody rapid prototyping	26
3.1 Stereolitografie(SLA)	29
3.2 Selective laser sintering (SLS).....	32
3.3 Solid ground curing (SGC)	34
3.4 Direct metal laser sintering (DMLS)	36
3.5 3D printing (3DP)	37
Závěr	38
Seznam použitých zdrojů	39
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	42
Seznam použitých obrázků.....	43
Seznam použitých tabulek	44

ÚVOD

Slévárenství patří k nejstarším způsobům zpracování kovu. Jeho vznik je spjat s objevem první slitiny kovu- bronzu. Ve střední Evropě se jedná o období asi před 4000 lety. Odlévání bronzu a jeho vývoj se vyvíjelo až do 17. století. Výroba litinových odlitků byla zahájena po objevu slitiny Fe a C, tedy šedé litiny. Jedná se o období kolem 16. a 17. století. Často se ve slévárenství odlévají výrobky složitých tvarů, které nelze vyrobit jiným způsobem (např. obráběním nebo svařováním). [1]

Modelové zařízení (jaderníky, modely, šablony) slouží k vytvoření dutiny netrvalé pískové formy. Modelové zařízení můžeme zhotovit v 5ti jakostních stádiích 0-4. Tvar modelu je shodný s výsledným odlitkem, jen je zvětšen o přídavek na obrábění. Dbá se na jeho jednoduchost a snadné vyjmutí z formy. Dle technologie odlévání se modely člení na trvalé a netrvalé. Trvalé modely se používají pro výrobu netrvalých, nejčastěji pískových forem. Vyrábí více než jedno zaformování a před samotným odléváním se musí z formy vyjmout; na rozdíl od modelů netrvalých. [1,2]

K velké změně při výrobě modelů došlo používáním výpočetní techniky a plastů. Zlevnila se výroba za použití CNC obrábění přímo z CAD modelu (viz obr. 1) a zkrátila se doba od návrhu modelu až k jeho zhotovení. Řada dalších technologií jako např. Rapid Prototyping se uplatnila ve slévárenství pro výrobu rychlého prototypu modelu. Ne však každá metoda je vhodná a musí se brát ohled na přesnost, technologičnost konstrukce a způsob formování. Velký zřetel je dnes také brán na výrobní náklady a je tedy nutné pečlivě volit technologii výroby modelu. [3]



Obr. 1 Konstrukce 3D modelu [4]

1 POŽADAVKY NA TRVALÉ MODELY

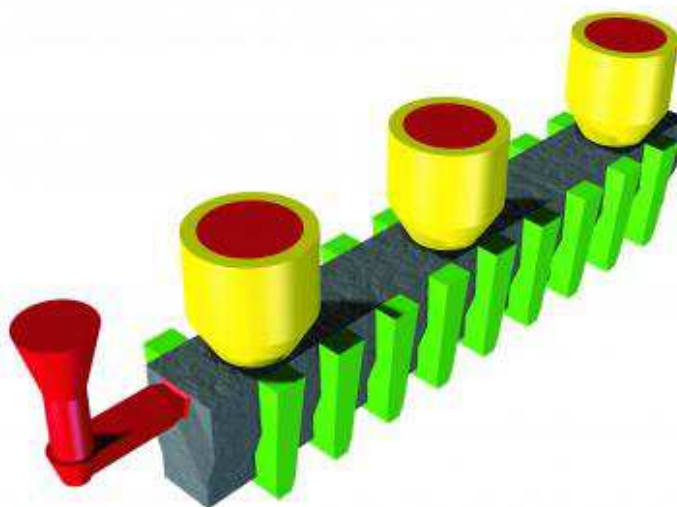
Kvalita odlitku závisí do značné míry na materiálu, jeho konstrukci a provedení. Náklady na výrobu modelu se promítají do ceny závěrečného odlitku. Proto použití drahých materiálů či technologie výroby musí být odůvodněno vysokým počtem odlitků. Při malé sériovosti se volí měkké odrůdy dřeva (borovice, jedle, smrk). Při velké sériovosti, kdy se formování na daném modelu bude několikrát opakovat, se volí kov, epoxidová pryskyřice nebo plast.

Důležitá je příprava před vlastní výrobou trvalého modelu. Ta zahrnuje rozhodování o:

- a) druhu materiálu, jenž má být použit
- b) typu modelu, aby vyhovoval způsobu zvoleného formování
- c) uložení jaderníku
- d) konstrukčních detailech, zahrnující zajištění snímatelných částí, známek jader atd.
- e) stupni třídy přesnosti
- f) druhu vtokové soustavy a nálitku
- g) zajištění slévarenských pomůcek

Je dobré připravit všechny konstrukční výkresy modelů a jaderníků a uvést všechny detaily a souvislosti. Modelář posléze může nakreslit všechny výkresy v plném rozsahu, které se stanou základem pro výrobu modelu a následně i pro jeho kontrolu.

Modelář má velmi důležitou roli ve výrobě modelu. Je zodpovědný za detaily formy a konstrukce. Musí být schopen interpretovat skici designera, vizualizaci modelu (viz obr. 2), nakreslit rozvržení položek a finální produkci modelu kompletně se vtokovou soustavou, nálitkem a dalšími pomocnými nástroji. Musí být v dnešní době dobře obeznámen s výpočetní technikou a programy na design a kreslení. [2, 5]



Obr. 2 Model odlitku s vtokovou soustavou a jaderníky [6]

2 MATERIÁLY MODELŮ

Výběr materiálu modelu závisí na faktorech:

- provozní požadavky jako jsou množství, kvalita a složitost odlitků, minimální tloušťka, požadovaná přesnost a kvalita
- možnost změny návrhu
- typ výroby odlitků a typ formovacího zařízení
- možnost opakovaných objednávek

Materiál by měl splňovat následující požadavky:

- snadno opracovatelný
- lehký pro manipulaci
- silný, tvrdý a trvanlivý
- odolný vůči opotřebení, otěru, korozi a chemickému působení
- tvarově stabilní pod vlivem teploty a vlhkosti
- levně vyrobitelný
- snadno opravitelný a znovu použitelný
- dobře povrchově upravitelný

Široký výběr materiálů pro trvalé modely může být rozdělen na (viz ilustrativní obrázky 4, 5, 6, 7):

- dřevo
- kovy a slitiny
- sádra
- plasty a pryže [2, 5]



Obr. 4 Dřevěný model [7]



Obr. 5 Kovový model [8]



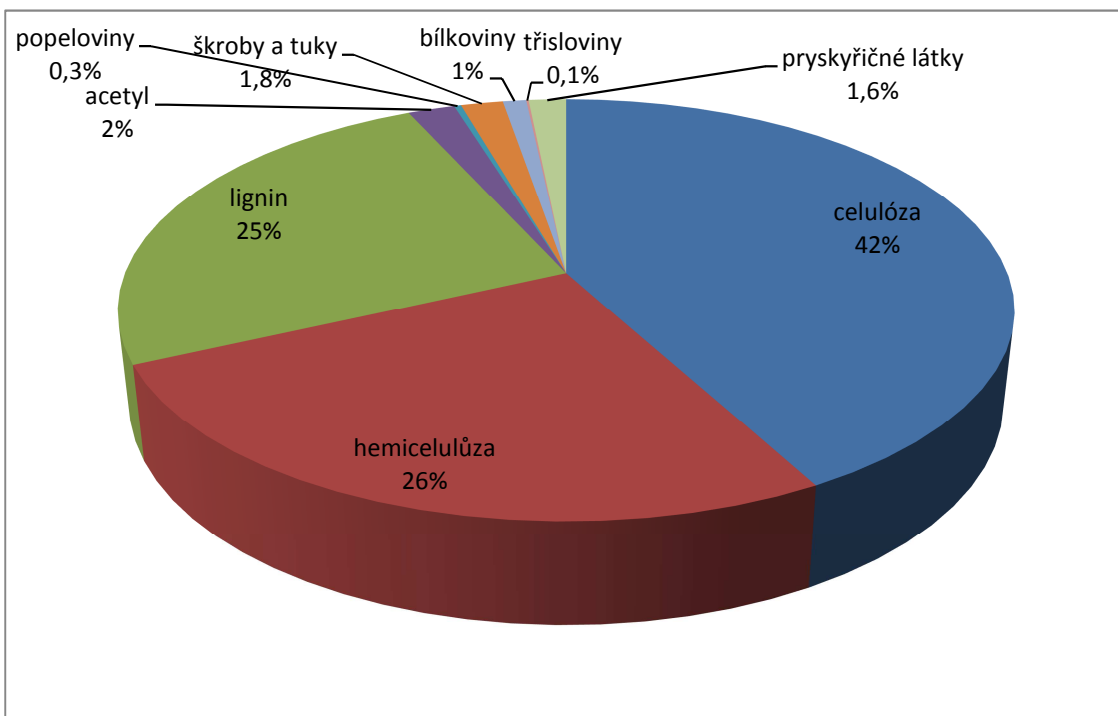
Obr. 6 Sádrový model [9]



Obr. 7 Plastový model [10]

2.1 Dřevo

Dřevo patří mezi nejčastěji používané materiály, protože splňuje většinu požadavků. Je snadno opracovatelné i do složitých tvarů, je lehce dostupné a náklady na pořízení jsou nižší než u ostatních materiálů. Má však také řadu nevýhod. Je náchylné k bobtnání nebo sesychání, málo tvrdé a vykazuje malou odolnost proti otěru. Složení dřeva je vidět na obrázku č. 8.

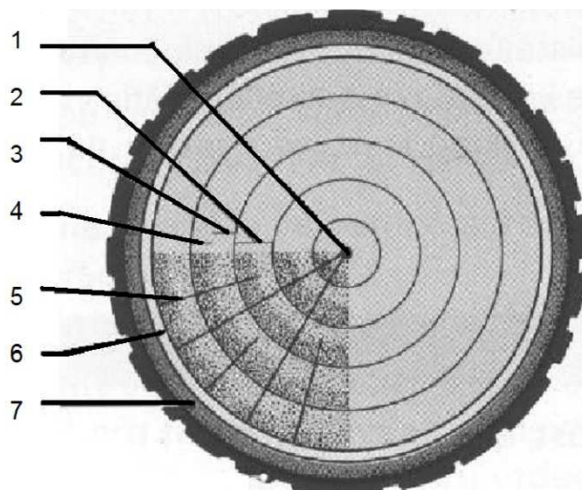


Obr. 8 Složení dřeva

Dřevo patří mezi anizotropní materiály. To znamená, že má v různých směrech různé vlastnosti z důvodu obsahu tzv. vláken. Ty představují rovnoměrně rostlé, 1-8 mm dlouhé buňky. Fyzikální vlastnosti (navlhavost, sesychavost, mechanické vlastnosti, elektrická, tepelná a akustická vodivost, vzhled, zpracovatelnost ...) se mění v závislosti na směru k vláknům a proto se musí tyto vlastnosti vždy uvádět se vztahem ke směru vláken.

Kmen stromu se vyznačuje po sobě jdoucími, kruhovými vrstvami buněk pod kůrou stromu, které se nazývají léta. Výkyvy počasí během roku mají za následek dvě struktury dřeva. Na jaře je rychlý růst stromu a buňky mají tenkou stěnu a otevřenou strukturu. V létě mají buňky silnější stěnu, které dělá strukturu dřeva uzavřenější a pevnější. To má za následek rozdíl ve struktuře dřeva, která se jeví ve formě charakteristických kruhových prstenců představující hranice mezi jarním a letním dřevem (obr. 9). Kmen stromu se dělí na dvě oblasti: vnitřní část- jádro, které je těžší, tvrdší a trvanlivější a vnější část- běl. Nejvzdálenější vrstva od středu pod kůrou je kambium. Zde je dřevo čerstvé, měkké a náchylné k rozkladu. [5, 12]

1. dřeň
2. letokruh
3. zóna jarního dřeva
4. zóna letního dřeva
5. dřeňové paprsky
6. kambium
7. lýko



Obr. 9 Složení dřeva [12]

Rozdělení dřeva dle:

- Tvrdosti: měkké, polotvrdé, tvrdé
- druhu porostu: listnaté, jehličnaté

Snažíme se využívat vyzrálé dřevo. Zralost jehličnanů se pohybuje v rozmezí 80-100 let, listnáčů 60-70 let, avšak například dub až kolem 150 let. Tabulka 1 uvádí rozdělení typů dřeva podle tvrdosti.

Tab. 2: Rozdělení dřeva dle tvrdosti

měkké	polotvrdé	tvrdé
smrk	bříza	buk
jedle	ořech	dub
borovice	olše	hrušeň
vrba	jilm	javor
topol		jasan
		mahagon
		palisandr

Nejpoužívanější dřevo na výrobu modelů pro slévárny jsou: borovice, mahagon, teak, ořech a cedr. Borovicové dřevo, i přes jeho měkkost, je nejoblíbenějším materiálem pro výrobu. Je oblíbené pro svoji lehkost, stabilitu a snadné opracování. Je vhodné tam, kde je malý počet odlitků (do 25 kusů) a do 500mm velikosti odlitku. Mahagon je velmi tvrdé, trvanlivé a odolné dřevo se zanedbatelným smrštěním či bobtnáním při sušení. Vytváří výborný lesk, dobře se moří i lepí (klíží). Mezi přírodními materiály je mahagon nejlepší volba. Je ideální tam, kde je vysoký počet požadovaných odlitků na formovacích strojích. Teak je také tvrdý a silný. Není napadán houbami a v dnešní době i poměrně snadno dostupný. Cedr je měkká odrůda dřeva, trochu těžší než borovice, ale snadno obrobitelná. Po opracování vytváří výborný lesk. [5, 11]

2.1.1 Sušení dřeva

Buněčné stěny dřeva jsou silně hygroskopické, protože hlavní složka, celulóza, obsahuje řadu hydroxylových skupin, které jsou silně hydrofilní. Pokud je dřevo vystaveno vlhkosti tak bobtná. Tato charakteristika dřeva snižuje jeho tuhost a rozměrovou stabilitu.

Voda ve dřevě může být:

- Volná (v dutinách uvnitř buněk a mezibuněčných prostorech)
- Vázaná (vyplňuje mikroskopické dutinky v buněčných stěnách)
- Chemicky vázaná (součást chemického složení dřeva)

Pokud dřevo ztratí vodu ve vázané formě, dojde k sesychání. To způsobí změnu rozměrů a hmotnosti. Ztráta volné vody nemá prakticky vliv na rozměrové změny. Chemicky vázaná voda je obsažena ve stavební struktuře a je ve dřevě i po jeho vysušení. Čerstvé dřevo má průměrně 50% vlhkosti, v lese vyschlé 25-30% a proschlé (na vzduchu vyschlé) 10-20%. [5] Tabulka 3 udává obsah vlhkosti dřeva při sušení na vzduchu.

Tab. 3: Obsah vlhkosti dřeva při sušení na vzduchu [11]

druh dřeva	obsah vody v % v poraženém stromu (% z váhy suchého dřeva)	obsah vody v % v pokáceném dřevu (% z váhy suchého dřeva)		
		za 6 měsíců	za 12 měsíců	za 18 měsíců
dub	50-70	48	39	27
bříza	50-70	33	22	19
osika	80-100	45	28	19
olše	80-100	28	23	18
jedle	140-150	41	20	18
borovice	140-150	41	-	19

Důvody k sušení dřeva:

- Rozměrová stálost
- Zpevnění a odlehčení
- Odolnost proti hnilobě
- Konzervace, barvení, broušení a ostatní povrchové úpravy

Sušení dřeva se může provést přírodní nebo umělou metodou. U přírodního sušení se dřevo vhodně naskládá a proudící vzduch dřevo vysuší. Sušení dřeva pro modelárny využívá nové moderní způsoby. Oproti konvenčnímu sušení horkým vzduchem (teplovzdušné sušení) se znatelně snižuje doba sušení a výrazně se tím zrychluje dodávka od zpracovatele dřeva (sušárny) k modelárně. [5]

Vysokofrekvenční sušení: Dřevo se vkládá mezi Al nebo Cu elektrody napájené vysokofrekvenčním proudem ($f = 500\,000\text{Hz}$). Rozkmitáním molekul vody vzniká teplo a tím dochází k vypařování. Doba sušení je krátká a pohybuje se mezi 2-5 hodinami. Nízké nároky na velikost sušárny. Vysoké náklady na provoz a vybavení. Vysoká spotřeba elektrické energie

Vakuové sušení: Princip metody spočívá v principu snížení body varu na 40-60°C za podtlaku (50-65 kPa). Řezivo je prokládáno termostatickými ohříváči. Vysoké nároky na těsnost provedení a automatizaci sušicího procesu. Šetrné a kvalitní sušení, nízká deformace, menší nároky na dobu sušení a spotřebu energie oproti teplovzdušnému principu.

Kondenzační sušení: Elektrická energie se mění na chlad (potřebný ke kondenzaci vlhkých par na vodu) a teplo (potřebné na ohřev vzduchu v sušárně). Nejmenší náklady na provoz ze všech technologií. Jako chladicí medium je používána směs plynu R134a, která nahradila nebezpečná freon.

Sušení přehřátou parou: Teplý vzduch je nahrazen přehřátou parou na 130°C. Jsou nutné speciální sušící komory. Výhody jsou snížení spotřeby energie a zkrácení doby sušení. Modeláren se příliš netýká. Jediná velká nevýhoda této technologie je to, že povrch dřeva mírně zhnědne. Vhodné zvláště pro sušení měkkých dřevin.

Infračervené sušení: Přenos tepla je zajišťován elektro- magnetickými vlnami ze zářičů. Nízká hloubka ohřevu (1-7 mm).

Chemické sušení: Teplovzdušnému sušení předchází napuštění dřeva roztokem soli (NaCl). Dojde ke zvýšení tlaku páry nad roztokem oproti vodě samotné. Povrchová vrstva pohlcuje páru, zatímco střední vrstva vysychá. Nevznikají povrchové trhliny. NaCl zůstává ve dřevě a způsobuje korozi kovu (například při okování modelů).

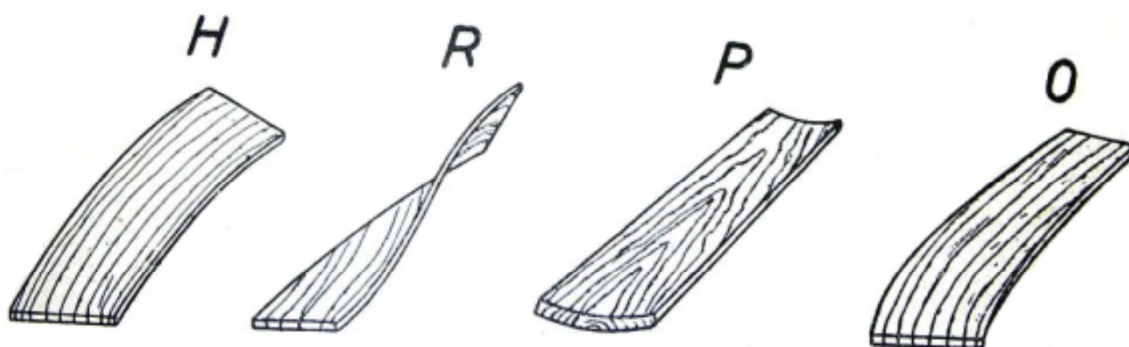
Sušení spalinami: Sušení pomocí kouře bez popílku a jisker. Levné sušení s využitím odpadního tepla. Výsledkem však je poměrně nekvalitní a znečištěné dřevo. [13]

2.1.2 Vlastnosti dřeva

Dřevo vysychá nerovnoměrně a z tohoto důvodu dochází k tvorbě vnitřních napětí (vlhkostní a zbytková). Po vyrovnaní vlhkosti ve dřevě zaniknou vlhkostní napětí, na rozdíl od zbytkových, která jsou trvalá. Způsobují trhliny, a proto je nutné dbát na správnou rychlost sušení. Důsledkem anizotropních vlastností dochází k borcení dřeva při sesychání (příčné a podélné). Příčné borcení se zvětšuje přímo úměrně se vzdáleností od jádra stromu a je znázorněno na obr. 10. Podélné způsobuje prohýbání nebo stáčení (obr. 11). Toto je velký nedostatek a porušené dřevo se musí označit jako zmetek.



Obr. 10 Příčné borcení dřeva [11]



Obr. 11 Podélné borcení dřeva: H-hákové, R-přes roh, P-normální, O-do oblouku [11]

Hustota dřeva je závislá na vlhkosti dřeva, proto rozdělujeme tři základní hustoty.

- ρ_0 při 0% vlhkosti
- ρ_{12} při 12% vlhkosti
- ρ_k jako konvenční hustotu (podíl suchého a vlhkého dřeva)

Průměrné hodnoty hustot vybraných druhů dřev jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4: Průměrné hustoty vybraných dřev [11]

dřevina	ρ_0 [kg.m-3]	ρ_{12} [kg.m-3]	ρ_k [kg.m-3]
smrk	420	450	370
borovice	505	535	455
dub	680	725	610
buk	685	720	570
javor	630	670	540
modřín	560	590	485
olše	495	530	440

Ne každý materiál se hodí pro výrobu dřevěného modelu. Musí se pečlivě volit a dbát na vady dřev. Nejčastější vady:

- suky
- trhliny
- vady kmene (křivost, zploštění, boulovitost)
- vady struktury (točivost, dvojité dřevě)
- napadení houbami
- poškození živočichy [11]

2.1.3 Moderní dřevěné materiály

Dřevěné lamináty (obr 12): Jsou vyrobeny vrstvením tenkých dýh dřeva slepených a slisovaných k sobě. Mohou být potaženy dýhou nebo impregnované syntetickou pryskyřicí. Laminátové desky mají výborné mechanické vlastnosti jako:

- Nízká hmotnost
- Vysoká pevnost v tlaku
- Vysoký modul pružnosti v ohybu
- Teplotní stabilita
- Nízký koeficient roztažnosti
- Antistatické
- Nízká tepelná vodivost
- Vysoká odolnost proti opotřebení
- korozi a chemická odolnost
- Odolnost proti benzínu, oleje a maziva
- Nízký koeficient tření
- Dobrá elektrická izolace

Odolnost proti vodě



Obr. 12 Laminátové desky [11]

Oproti přírodnímu dřevu vykazují větší rozměrovou stálost. Vyrábějí se v různých deskách o velikosti 12 až 15 mm. Existují ještě nejmodernější druhy laminátů, kdy se do směsi dřeva a lepidla přidává kovový prach (kovové třísky) pro zvýšení opotřebení a otěru. [11]

Wood-plastic composites (zkratka WPC): Vyrábí se ze směsi dřeva a polymeru. Technologie je stará asi 15 let. Materiál eliminuje nežádoucí vlastnosti dřeva (hniloba, plísně, napadení hmyzem, změna barevnosti, sesychání, kroucení, nerovnosti, třísky, negativní vliv slunce, mrazu, vody, apod.). Jedná se o uměle vytvořené dřevo (obr. 13). Dá se jednoduše impregnovat pryskyřicemi. Velmi využívané v Severní Americe. Trend používání WPC pomalu proniká i do Evropy. [14]



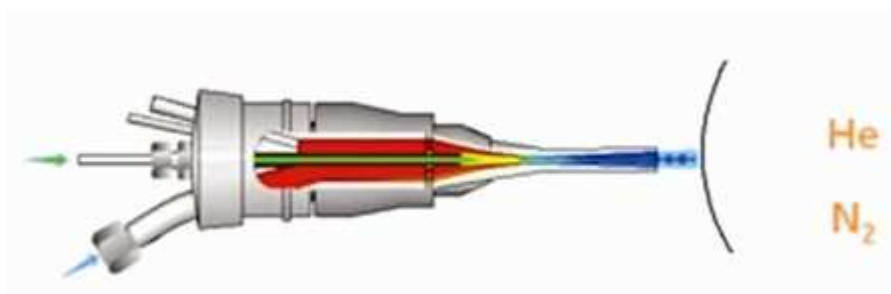
Obr. 13 WPC [15]

2.1.4 Dřevěné modely s kovovými povlaky

Jsou určeny pro malé výrobní série, kde se nevyplatí použít kovový model, ale vzhledem k nízké pevnosti se nemůže použít dřevěný model. Dřevěný model se postříká tenkou vrstvou kovu. Tloušťka vrstvy je asi 0,25mm a nejpoužívanější kovy jsou bismut, zinek a hliník. Kov je ve formě drátu nebo

prášku přiváděn do stříkací pistole, kde je taven pomocí kyslíko-acetylenového plamene. Pod tlakem je pak vháněn ze stříkací pistole na povrch dřeva. Další moderní úpravou je nátěr modelu přípravky obsahující kov (např. Lab-metal od firmy Alvin products). [11]

Technologie studeného nástřiku (cold spray): Jedná se o urychlení prachových částic nad rychlost zvuku a přeměna kinetické energie na deformační a tepelnou. Vrstva na povrchu má unikátní vlastnosti. K přenosu kovového prášku se používá procesní plyn. Ten se nejdříve zahřeje a následně je urychlen expanzí v Lavalově trysce, jak je znázorněno na obr 14. Proudící plyn strhává částice kovu, které se zahřívají a deformují. Vzniká tak celistvá vrstva s jemnou a homogenní strukturou. Materiál, který se nanáší na povrch modelu, musí být deformovatelný pod teplotou 900°C. Jsou to zejména měď, hliník. Jako procesní plyn zde používáme dusík nebo helium. [16]



Obr. 14 Schéma stříkací pistole pro studený nástřik [16]

Okování dřevěných modelů:

Provádí se plechovými pásy o tloušťce 2-3 mm. Zabrání se tím opotřebení zejména hran modelu, které jsou nejvíce namáhány. Materiál kovu se nejčastěji volí hliník a mosaz pro jejich korozivzdornost. Kov se dá v některých případech nahradit tvrzeným plastem. Okování nesmí narušit geometrii modelu a musí se s ním počítat už při návrhu dřevěného modelu. Pláty plechu musí být zapuštěny do dřevěného modelu. [11]

Okování hran jaderníku je uvedeno na obrázku 15.



Obr. 15 Okování jaderníku [11]

2.1.5 Stroje pro výrobu dřevěných modelů

Většina ze strojů vyskytujících se v modelárnách slouží i v jiných profesích zabývajících se dřevem. Výroba speciálních profilů, jako ozubení, jsou efektivněji prováděny na speciálních strojích, zvaných frézovací centra. Velikost a kapacita strojů úzce souvisí s objemem práce, kterou budou vykonávat. Stroje pro modelárny by měly být nejen pevné konstrukce a značných rozměrů, aby se vypořádaly s velkými modely, ale měly by být také velmi přesné. Mezi stroje pro obrábění dřeva patří:

- **Pila/formátovací pila:** umožňující příčné i podélné dělení dřeva. Moderní stroje dostaly počítačem řízený systém. Dosahují vysoké přesnosti a umožňují vyšší kapacitu výroby než konvenční pily.
- **Soustruh na dřevo:** je jednoduchý hrotový soustruh s ložem, vřeteníkem a koníkem. Dláto je drženo soustružníkem, který jej opírá o posuvnou opěrku.
- **Hoblovačka či srovnávačka** je vodorovná frézka na jemné obrábění rovinných ploch, zejména prken a trámů. Ve stole je napříč zapuštěn válec se dvěma až čtyřmi přínými a nastavitelnými noži o délce 200–600 mm. Válec má vysoké otáčky, průměr několik cm a může ubírat až 3–5 mm materiálu najednou. Materiál může být ke stolu přitlačován pružnými přitisky, posun do záběru je ruční.
- **Protahovačka či tloušťkovačka** pracuje na stejném principu, materiál se ale posouvá do záběru mechanicky drážkovanými válečky, které jej přitlačují k nastavitelné desce naproti hoblovacímu válci, takže obrobek má definovanou tloušťku. Maximální šířka obráběného materiálu může být 200–800 mm.
- **Dlabačka** je malá frézka s vysokými otáčkami, na níž se vyrábějí drážky, zapuštění nebo okrajové profily.
- **Bruska na dřevo** pracuje se smirkovým plátnem různé zrnitosti a slouží k jemnému broušení povrchů. Užívají se brusky čelní (kotoučové) a pásové.
- **CNC obráběcí centra, frézovací centra** jsou moderní obráběcí stroje, které kombinují více operací na jednom místě, od jednoduchého vrtání z více stran až po kompletní obrobení i velmi složitých tvarů.

V praxi platí všeobecně známé pravidlo: Čím je dřevo měkčí, tím ostřejší nože musí srovnávačka nebo protahovačka mít. Tvrdé dřevo klade odpor, a tak i tupějšími noži dosáhneme dosti hladkého povrchu. Měkké dřevo má ale povrch potrháný a "chlupatý". [17, 18]

2.2 Kovy a slitiny

Kovové modely se používají tam, kde je požadován vysoký počet odlitků. Obvykle používané materiály jsou slitiny hliníku, litina, ocel a slitiny na základě mědi jako mosaz a bronz. Vyhodnocení vlastností materiálů je dáno v tab. 5.

Tab. 5: Vlastnosti kovových materiálů [5]

Vlastnost	šedá litina	ocel	hliník	mosaz
dostupnost	dobrá	dobrá	dobrá	dobrá
slévateľnost	dobrá	obtížná	méně obtížná	dobrá
obrobitelnost	dobrá	dobrá	velmi dobá	velmi dobá
povrchová úprava	dobrá	dobrá	velmi dobá	velmi dobá
schopnost přetvoření	dobrá	dobrá	dobrá	velmi dobá
hmotnost	velmi těžká	velmi těžká	velmi lehká	těžká
křehkost	vysoká	nízká	nízká	nízká
oxidace	ano	ano	ne	ne
vyžaduje mechanizaci	ano	málo	málo	málo
cena	nízká	nízká	střední	vysoká

Litinové modely se používají jen pro malé odlitky kvůli vysoké hmotnosti. Výhodou je nízká cena litinového odlitku. Naprostá většina kovových modelů se vyrábí ze slitin hliníku. Ty se dá dobře odlévat, má dobrou pevnost a opotřebení proti otěru. Nejlepších vlastností dosáhne po tepelném zpracování a zušlechťování. Jednoduchých tvarů se dá lehko dosáhnout z válcovaných polotovarů obráběním. Dural (duraluminium) se také výborně hodí k výrobě modelů. Obsahuje obvykle 90-96% hliníku, 4-6% mědi a zbytek tvoří přísady hořčíku, manganu aj. Je o trochu těžší, avšak až pětikrát pevnější v tahu a tvrdší než hliník. Mechanické vlastnosti se zvyšují tepelným zpracováním a zušlechťováním podobně jako u ocelí. Z duralu se dá také odlívat. Mosaz a bronz jsou výbornou volbou pro výrobu modelů ve slévárenství. Kromě pevnosti a tvrdosti mají vysokou odolnost proti korozi. Lehce se obrábí a spojují. Jejich nevýhoda je však vysoká cena.

Lehké slitiny jako bílé kovy nebo slitiny obsahují cín a bismut (cín a bismut v poměru 60:40 nebo 43:53) se používají pro výrobu forem na modely z pryskyřic nebo sádry. Mají nízkou teplotu tání (cca 138°C) a umožňují odolnost proti nízkým teplotám. Mají nízký koeficient roztažnosti (0,5 mm na jeden metr). Jsou poměrně tvrdé, těžké a tvárné. [5]

Moderní metody jako **elektro-deposition** nebo **elektro-forming** mohou být nově aplikovány ve slévárenství. Galvanické pokovování (elektro-deposition) využívá elektrický proud přenos iontů kovu v roztoku v elektrickém poli. Ionty se nanášejí na katodu (slévárenský model). Kationty použitého kovu (nikl, chrom, měď) se na katodě redukuje z roztoku a potahují model tenkou vrstvou materiálu. Nanesená vrstva má obvykle lepší odolnost proti otěru a obrusu, korozi aj.) Metodu lze i použít pro zvětšení předmětů (elektro-forming). [5, 19]

Zmrazená rtuť se také používá jako materiál v „Mereast process“. Metodu lze použít pro výrobu vysoce složitých a přesných odlitků. Použití je však limitováno vysokými náklady. [5]

Způsoby obrábění kovových modelů

Výroba kovových modelů se provádí technologickým procesem zvaný obrábění kovů. Požadovaný tvar modelu se dosáhne odebráním materiálu z polotovaru. Způsob volby technologie obrábění záleží na stupni přesnosti, složitosti, hmotnosti a materiálu. Ruční obrábění je na ústupu před moderními, číslicově řízenými stroji.

Mezi tradiční (konvenční) způsoby obrábění patří:

- Třískové
- Mechanické
- Obrábění řezáním

Netradiční (nekonvenční) obrábění:

- Elektrojiskrové
- Chemické
- světelným paprskem – laserem
- vysokotlakým proudem vody

Ruční obrábění:

- Pilování: patří mezi ruční obrábění. Používány jsou pilníky různých délek, tvarů a hrubostí.
- Zaškrabávání: také ruční obrábění, při němž se škrabákem dosahuje co nejvyššího povrchu obráběné plochy (nikoliv drsnosti, ale geometrické kvality).

Třískové obrábění: dochází k oddělení materiálu a vzniku třísky břitem nástroje, který vniká do materiálu. Základem obrábění je teorie vzniku třísky. Během třískového obrábění rozlišujeme několik pohybů. Pohyb do řezu (hlavní pohyb), kterým se odebrá tříska; např. u soustruhu jej vykonává obrobek, u frézy nástroj. Pohyb do záběru čili posuv (vedlejší pohyb) je k němu zpravidla kolmý a nástroj se jím posouvá na jiná místa povrchu obrobku. Ten může být podélný a příčný, plynulý nebo přerušovaný. Přísuvem nejčastěji nastavujeme hloubku řezu a je kolmý k obráběnému povrchu modelu

Hlavní druhy třískového obrábění

- Soustružení: obrobek rotuje a nůž se posouvá po jeho povrchu (strojním nebo ručním posuvem).
- Frézování: nástroj (fréza) rotuje a upnutý obrobek se posouvá k nástroji. Jedná se o opačný systém než u soustružení.
- Vrtání: nástroj (vrták) rotuje a posouvá se k obrobku. Můžeme vrtat i na soustruhu, kde vrták je držen koníkem stroje.
- Vystružování: jedná se o dokončovací operaci, která následuje po vrtání (nebo vyhrubování), když je třeba docílit přesný rozměr díry a zároveň kvalitní povrch. Nástroj – výstružník se posouvá k obrobku. Předvrtaná díra musí mít relativně malý přesah (desetiny mm).
- Řezání: používá se nejčastěji při dělení dlouhých kulatin na požadovaný rozměr (s ponecháním přídatku na další obrábění). Nejčastěji se dnes využívá poloautomatických nebo automatických pásových pil.

- Hoblování: jedná se o obrábění ploch, kdy obrobek je upnut a vykonává hlavní řezný pohyb, nůž vykonává posuv a přísuv. Dnes velmi málo používaná metoda.
- Obrážení: obrábění ploch, kde obrobek je upnut a nástroj vykonává hlavní řezný pohyb. Používá se například pro výrobu modelů ozubených kol.
- Broušení: odebírání materiálu nástrojem s nedefinovanou geometrií břitu. Rozlišujeme broušení:
 - Na kulato: používá se pro výrobu rotačních součástí o vysoké přesnosti. Obrobek se pomalu otáčí upnut mezi hroty ve středících důlcích. K němu se přisouvá brusný kotouč o vysokých otáčkách. Tímto způsobem lze brousit i otvory.
 - Na plocho: používá se pro výrobu rovinných i tvarových ploch. Obrobek je upnut a vykonává přímočarý vratný pohyb. K němu se přisouvá brusný kotouč o vysokých otáčkách.
- Superfinašování: za pomoci vibrujícího nástroje se dosahuje co nejlepší drsnosti povrchu u rotačních součástí.
- Lapování: používá se při něm brusných lapovacích past. Touto metodou lze dosáhnout velmi kvalitních drsností povrchu
- Honování: dokončovací obrábění vnitřních nebo vnějších povrchů válcových součástí.

Moderní druhy obrábění:

- Elektrojiskrové obrábění (EDM): Také elektroerozivní obrábění je technologie, kde k odběru materiálů dochází působením drobných elektrických výbojů. Ty jsou vytvářeny mezi obráběcí elektrodou a obrobkem. Prostředí, ve kterém se výboj šíří, je kapalně dielektrikum, neboť odebraný materiál je třeba vyplavovat. Proud má intenzitu až desítky ampér. Obrobek může být libovolně tvrdý kov, ale i další materiály. Hlavní metody jsou:
 - Elektrojiskrové řezání: elektrodu představuje tenký mosazný drát, který je pomalu odvíjen. Řízení CNC umožňuje vyřezávat téměř libovolné tvary.
 - Elektrojiskrové hloubení: měděná pasta se výboji zabořuje do obrobku a vytváří tak přesnou negativní kopii
- Řezání laserem: Odběr materiálu působí úzký svazek laserového záření o vysoké hustotě energie (optický zdroj emitující fotony v koherentní paprsek). Užívá se k přesnému řezání a vyřezávání kovů i jiných materiálů.
- Řezání vodou o vysokém tlaku: Tenký proud vody působí podobně jako paprsek laseru. Počítačové řízení umožňuje výrobu téměř libovolných tvarů.
- Chemické obrábění: Spočívá v chemickém odběru materiálu, například leptáním. Leptat se může kyselinou (chromitou, dusičnou, fluorovodíkovou, ...) [20]

2.3 Sádra

Sádrový prášek po smíchání se správným množstvím vody vytvoří po nějakém čase pevnou hmotu s přijatelnou pevností kolem 220 N/mm^2 . Sádra se řadí mezi vzdušné maltoviny, kam patří například i cement. Vzniká dehydratací sádrovce v pecích mezi teplotami $200\text{-}1000^\circ \text{C}$. Doba tvrdnutí sádry dle přísad je uvedena v tabulce 6. Po ztvrdnutí nesmí u sádrových modelů dojít ke kontaktu s vodou nebo vysokou vzdušnou vlhkostí. Pak může dojít k poklesu pevnosti až o 45%. Z tohoto důvodu je nutné v modelárnách uchovávat sádrové modely v suchém prostředí.

Tab. 6: Doba tvrdnutí sádry [5, 11]

Druh	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Změna objemu
rychle tuhnoucí (hemihydrátová)	2 min	15 min	+1%
normálně tuhnoucí	6 min	30 min	+1%
pomalů tuhnoucí (anhydritová)	20 min	90 min	+2%

Volbou vhodné sádry (sádrové směsi) a rychlosti vysychání lze předejít vzniku vad sádrového modelu, zejména pak staženin a vzduchových bublin. Tvrdost lze zvýšit například přidáním portlandského cementu nebo mastku. Na obrázku č. 16 je vidět šablonování do sádry. Zvýšit dobu tuhnutí lze káseinem nebo kyselinou mléčnou, opačný efekt mají soli (NaCl , KCl). [5, 11]



Obr. 16 Šablonování do sádry [21]

2.4 Plasty a pryže

Plasty, se dělí na reaktoplasty (dříve duroplasty nebo termosety), termoplasty a elastomery (pryže). Jedná se o syntetické nebo polosyntetické polymerní materiály obsahující často látky ke zlepšení užitých vlastností. Jde zejména o odolnost proti stárnutí, zvýšení pružnosti, zvýšení houževnatosti apod. Jsou snadno tvarovatelné- plastické. Spotřeba plastů na naší zemi neustále roste a našly také uplatnění ve výrobě slévárenských modelů. Reaktoplasty se používají pro výrobu odolných a dlouhotrvajících modelů, termoplasty pak pro kusovou výrobu nebo menší výrobní série. Mají velmi široké pole vlastností. Základní rozdělení plastů dle chemického složení je znázorněno v tabulce č. 7.

Tab. 7: Plasty dle chemického složení [22]

TERMOPLASTY			
Polyolefiny		Akryláty	
PE		PMMA	polymethylmetakrylát
	HDPE	MBS	metylmetakrylát- butadien- styren
	LDPE	Polyamidy	
	UHMWPE	PA	polyamid
PP		Polyétery	
Chlorované plasty		POM	polyoxymetylén
PVC	polyvinylchlorid	PFO	polyfenylénoxid
Styrénové plasty		Polyestery	
PS	polystyrén	PET	polyetylénftalát
	PS-GP	PBT	polybytyléntereftalát
	OS-HI	PC	polykarbonát
	PS-E	Vinylové plasty	
SB	styrén- butadien	PVAC	polyvinylacetylát
ABS	akrylonitril- butadien- styren	Ketony, sulfidy, sulfony a imidy	
SAN	styrén- akrylonitril	PEEK	polyéterétherton
ASA	akrylonitril- styrén- akrylát	PPS	polyfenylénsulfid
Fluoroplasty		PSU	polysulfon
PTFE		PES	polyéthersulfon
ETFE		PI	polyimid
REAKTOPLASTY			
Fenoplasty		Epoxidy	
PF	fenolformaldehydová pryskyřice	EP	epoxidová pryskyřice
Aminoplasty		Polyesterové pryskyřice	
UF	močovinoformaldehydová pryskyřice	PESL	polyesterové skelné lamináty
MF	melaminové pryskyřice		

Výhody:

- nízká hustota
- chemická odolnost
- jednotnost složení a struktury
- dobrá zpracovatelnost energeticky nenáročnými technologiemi [22]

2.4.1 Reaktoplasty

Reaktoplasty (duroplasty, duromery, termosety) patří mezi zesíťované polymery vytvářející prostorou trojrozměrnou síť. Při tváření plastu, vlivem tepla a tlaku (někdy katalyzátoru), vzniká zesíťování. Po skončení zesíťování již není možné tento proces opakovat, neboť dalším působením energie již nedojde k roztavení hmoty. Vytvrzováním reaktoplastu rozumíme husté, příčné zesíťování materiálu. Vytvoří se kovalentní vazby mezi molekulami polymeru. Reaktoplasty jsou netavitelné a nerozpustné a těchto vlastností se využívá při výrobě slévárenského modelu.

Epoxidové pryskyřice patří mezi materiály s dobrou adhezí ke keramice, kovu a sklu v širokém spektru teplot. Nachází uplatnění i jako matrice kompozitů. Vytvrzují se katalyzátory jako aminy a kyseliny. Před vytvrzením se vyskytují jako viskózní kapaliny. Modely z epoxidových pryskyřic mají nulovou smršťovitost po odlití. Tím se dosahuje přidáním litinového nebo hliníkového prášku. Povrch je hladký, čistý a není proto nutné další úpravy. Fotografie modelu



z tohoto materiálu je na obr 17. **Obr. 17** Model z epoxidové pryskyřice [24]

Navzdory vysoké ceně pryskyřice, vyjde výroba levněji, než u hliníkových modelů, protože odpadají náklady na drahé odlévání a obrábění hliníku. Do modelu je možné vytvořit různé kapsy a dutiny, pokud to konstrukce umožňuje. Do pryskyřice se namáčí také skelná vlákna a vrství se na sebe do požadovaného tvaru. Takto vytvořený model se špatně obrábí a konečného tvaru se dosahuje většinou broušením. Šetřit materiál (pryskyřici) lze také způsobem, kdy se vyrobí jen tvrdá povrchová vrstva a vnitřek modelu je vyplněn jiným materiálem. Pro zvýšení pevnosti a tvrdosti se do pryskyřice přidávají vhodná plniva jako mastek, křídový prášek, břídlíkový prášek, jemný písek aj.

Fenolytické pryskyřice se dělí podle polykondenzačních látek ze kterých vznikají na: fenolové, krezolové a xylenové. Vytvrzují se teplem a jsou nehořlavé.

Kaučuky (obr. 18) se vytvrzují vulkanizací. Jde o chemickou reakci kaučukové směsi při teplotě kolem 200°C za přítomnosti vulkanizačního činidla, zejména síry. Ta spojí molekuly polymeru příčnými vazbami. Snesou tahové namáhání.

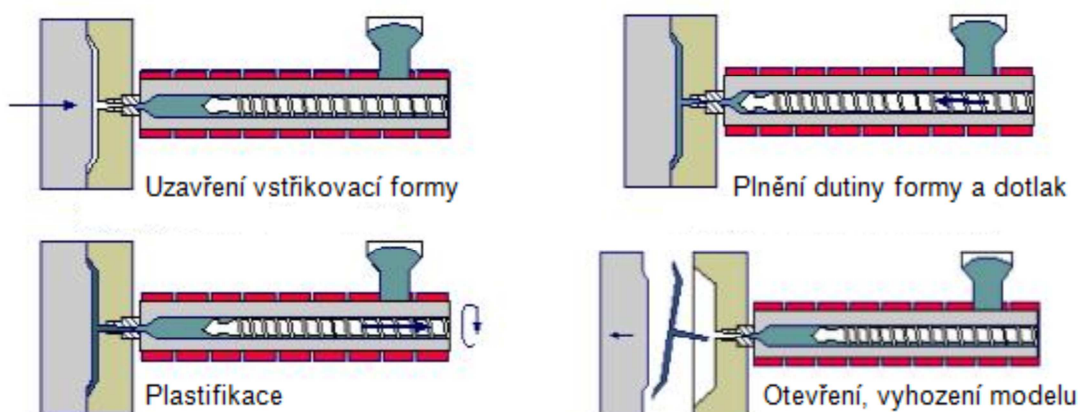
Vynikají výbornými mechanickými vlastnostmi. Jsou pružné a odolné proti cyklickému namáhání. Nepodléhají korozi ani působení některých chemických látek. Nejčastějším používaným typem v modelárnách jsou styrenové kaučuky, kde stavebním prvkem je především butadien a styren (SB, ABS).



Obr. 18 Kaučukový model [25]

2.4.2 Termoplasty

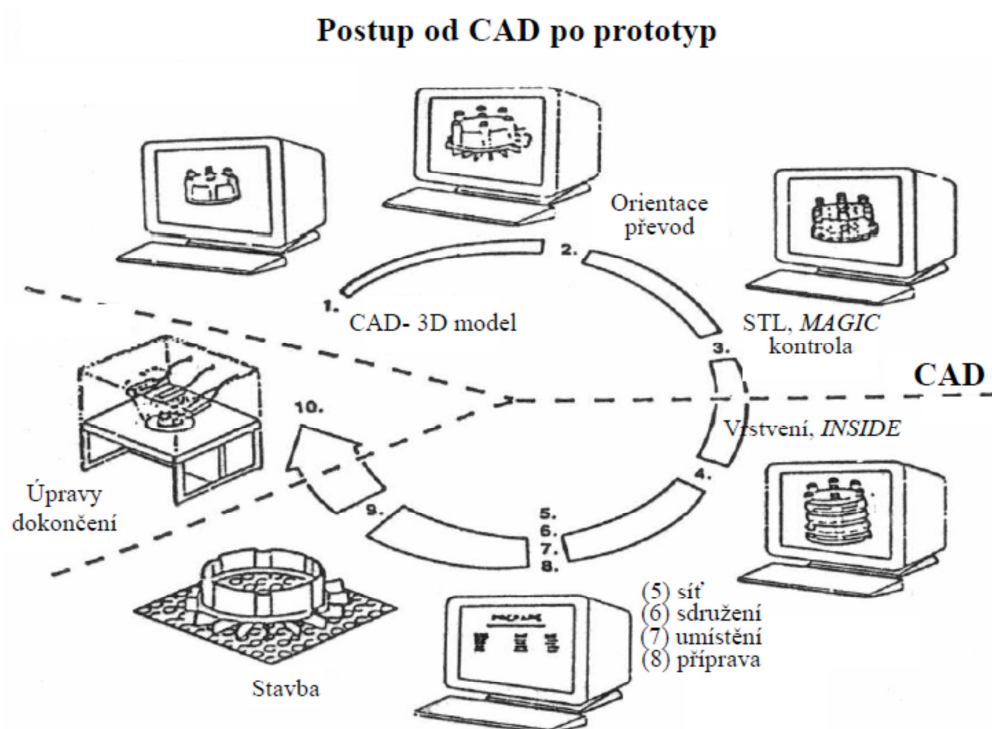
Při působení tepla se termoplast stává tvárným (plastickým), po ochlazení se stane pevným. Tento cyklus může nastat opakovaně na rozdíl od reaktivních plastů. Termoplasty patří mezi polymery složené s lineárními molekulami s dlouhým řetězcem. Řetězce drží u sebe pouze mezimolekulárními interakcemi (van der Waalsovými silami, vodíkovými můstky, interakcemi dipól-dipól). Tání u termoplastů nastává mezi 100 °C a 130 °C (nelze přesně určit vzhledem k různé délce lineárních řetězců). Lze je velmi snadno odlévat a lisovat. Náklady na sériovou výrobu plastových modelů z termoplastů jsou jedny z nejnižších. Schéma výroby termoplastového modelu je znázorněno na obrázku č. 19. [5, 22, 23]



Obr. 19 Výroba modelu z termoplastu [22]

3 METODY RAPID PROTOTYPING

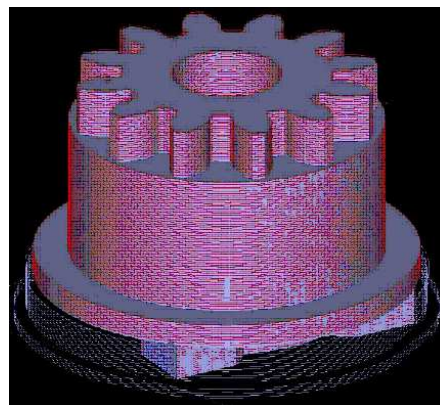
Metody Rapid prototyping (dále jen RP) umožňují vytvoření výrobku pomocí počítače. Mají možnosti simulace, ověření funkčnosti, pohyblivosti atd. Vytvářené výrobky mohou být rozmanitých tvarů, velikostí a barev. I zde však nalézáme určitá omezení. Největší výhodou je tvorba velmi složitě tvarovaných součástí, které bychom konvenčními metodami vyráběli jen stěží. Vytvořené prostorové předměty mají samonosnou konstrukci. Zjednodušeně lze popsat výrobu modelu asi takto: virtuální model vytvořený v CAD/CAM programu (Pro engineer, CATIA, Power Mill) nebo načtený scannerem je přenesen ve vhodném formátu (STL, MAGIC) do softwaru 3D tiskárny. Ta již, bez významné obsluhy člověka, model vyrobí. Postup výroby je patrný na obr. 20. [5, 26, 27]



Obr. 20 Postup výroby od CAD modelu po prototyp [27]

Během krátké doby proto může být pro zákazníka vyroben funkční a celkem levný model, který je možno si „osahat“ a případně konzultovat změny. Snižují se tak náklady a čas při konečné realizaci a celkový projekt může být v budoucnu optimalizován pomocí prototypových dílů.

Na rozdíl od běžných metod obrábění, kdy je materiál odebrán z polotovaru, se u metod RP se materiál přidává v jednotlivých vrstvách (obr 21) nebo vytvrzuje. Ty mohou být tenké jen desetiny až setiny milimetru.



Obr. 21 Vrstvení materiálu [27]

Metody jsou přesné, avšak povrch není hladký z důvodu vrstvení. Nejpoužívanějším materiálem pro tisk trvalých modelů jsou zejména tekuté pryskyřice, ASB plast a práškové materiály obsahující plasty, kovy nebo keramiku.

Využití RP technologie:

- **Prostorové zobrazení objektů** - zobrazení složitých prostorových útvarů, které si zákazník neumí dobře představit, například jen na monitoru.
- **Kontrola produktu** - používáno při kontrole výsledného tvaru, funkčnosti navrhovaného modelu.
- **Vývoj produktu** - navrhovaný model je možno během vývoje snadno vyrobit a následně korigovat další vývojové fáze.
- **Optimalizace** - korekce tvaru, snazší výběr lepšího návrhu.
- **Výroba** - RP lze použít i ve spojení s další navazující výrobou, např. odlévání metodou spalitelného modelu, pro výrobu forem k odlévání atd.
- **Reverzní inženýrství** - v případě neexistence nebo ztráty výrobní dokumentace lze pomocí optického 3D scanneru vytvořit virtuální model podle existujícího modelu a data pak využít pro RP.

Nevýhody metod PR:

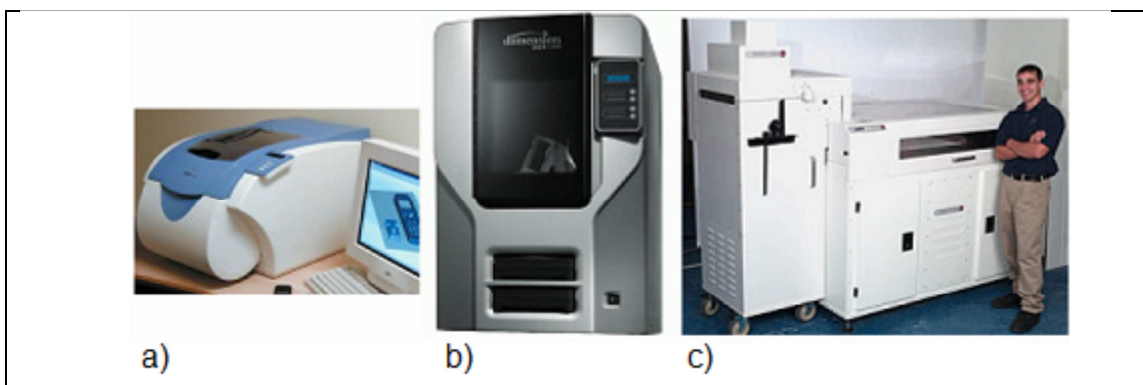
- Menší přesnost než u konvenčních metod
- Povrch součásti není hladký
- Nevhodné pro sériovou výrobu

Výhody metod RP:

- Libovolná geometrie součástí
- Automatická výroba
- Rychlá a levná výroba modelu

3D tiskárny lze rozdělit dle velikosti pracovního stolu (viz obr. 22). Ten odpovídá velikosti modelu, pro který je určen. Dělíme je na:

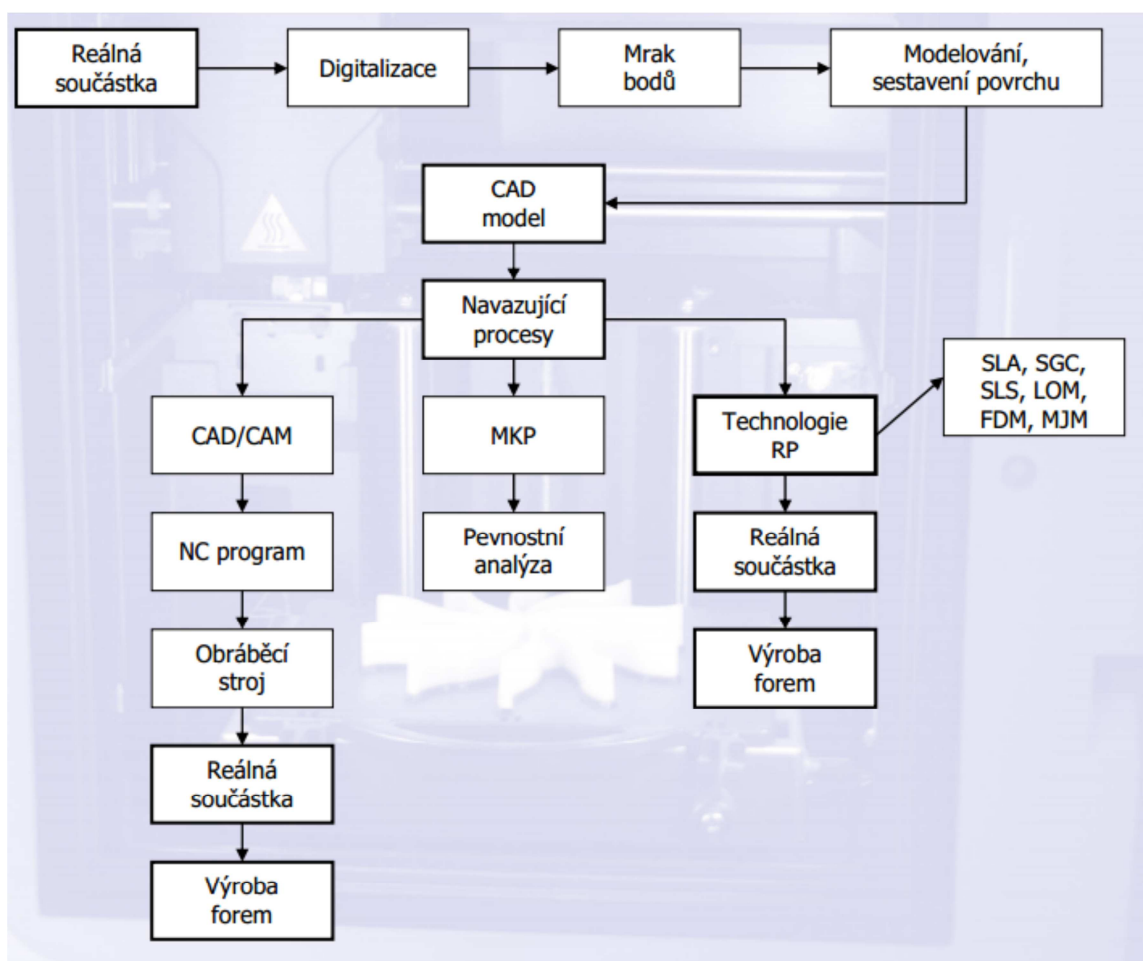
- Malé- pracovní stůl do rozměrů 210 x 210 x 210 mm.
- Střední- pracovní stůl do rozměrů 460 x 460 x 1070 mm.
- Velké – pracovní prostor nad 460 x 460 x 1070 mm. [26, 27]



Obr. 22 Různé velikosti 3D tiskáren [26]

- a) Solido SD 300 PRO – pro velikost modelu: 160x210x135 mm, hmotnost tiskárny: 40 kg
b) Dimension 1200 – pro velikost modelu: 254x254x305 mm, hmotnost tiskárny: 148 kg
c) Z810 System – pro velikost modelu: 500x600x400 mm, hmotnost tiskárny: 565 kg

Na obrázku číslo 23 je uveden vývoj a proces vzniku součásti metodou rapid prototyping.



Obr. 23 Vývoj a proces vzniku součásti metodou RP [26]

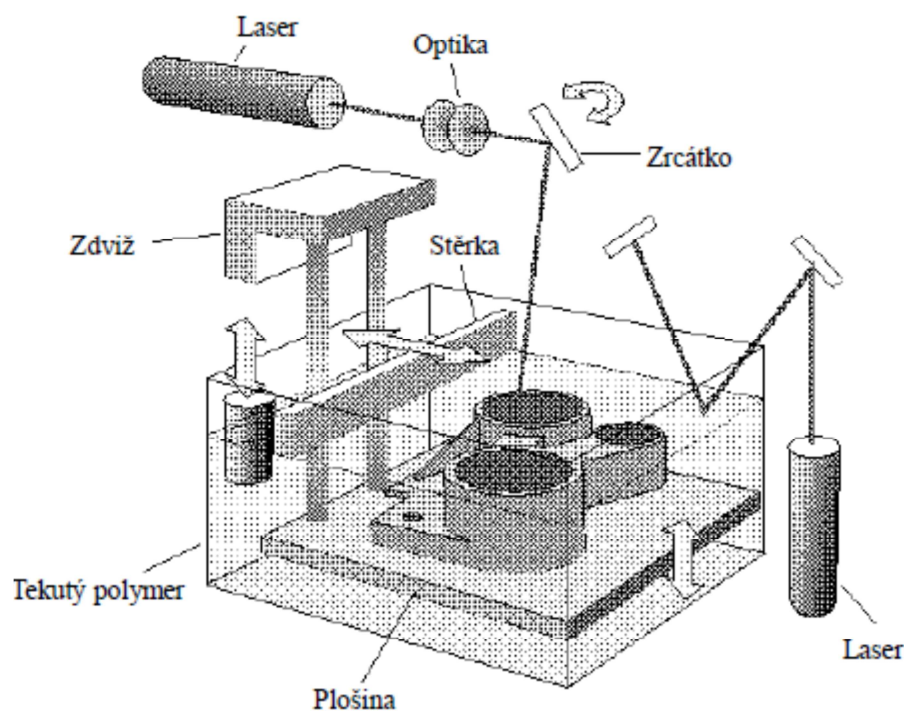
Stručný přehled používaných materiálů pro jednotlivé metody RP uveden v tabulce číslo 8. [26]

Tab. 8: Používané materiály pro jednotlivé metody RP [26]

Základní technologie Rapid Prototyping	Zkratka	Materiál modelu
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonat
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky
Solid Ground Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer

3.1 STEREOLITOGRAFIE (SLA)

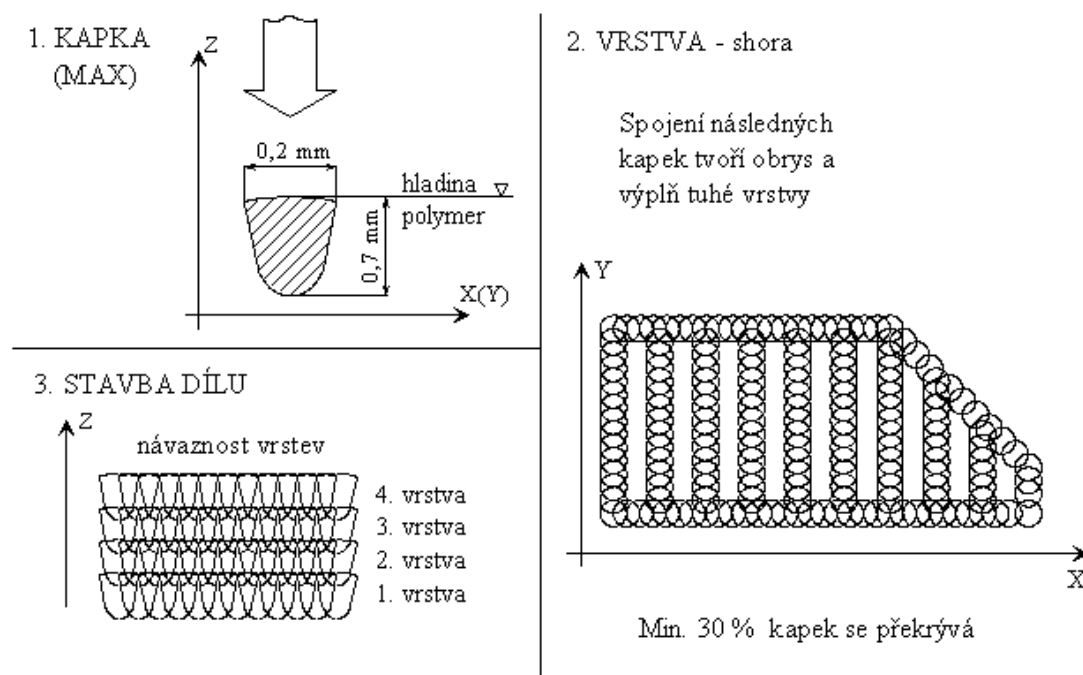
Metoda byla uvedena na trh již v roce 1987 společností 3D Systems, Inc. Jedná se tedy o nejstarší metodu Rapid Prototyping. Stále je jedna z nejpoužívanějších. Stereolitografie je velice přesná metoda. Model je vytvářen postupným vytvrzování tekutého fotopolymetu (plast citlivý na světlo) UV laserem. Nejčastěji je to epoxidová a akrylatová pryskyřice. (rozdělení materiálů viz tab. 9). Pro vytvrzení je používán zejména heliumcadmiový (HeCd), argonový (Ar+), nebo pevnolátkový Nd:YAG laser. Přesná metoda vytváří poměrně hladký povrch. Lze vytvořit modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Modely lze tedy následně lakovat nebo i pokovovat a tím získají mnohem lepších vlastností potřebných ve slévárenství. Princip metody znázorněn na obr. 24.



Obr. 24 Stereolitografie [26]

Data se přenáší ve formátu *.STL. Model je tak rozdělen na velké množství příčných řezů o stejné tloušťce. UV laserový paprsek vytvrzuje tekutou pryskyřici v pracovním prostoru nad základní deskou pouze v místě dopadu. K určení přesné polohy v osách X, Y jsou používána pohyblivá zrcadla umístěna ve skenovací hlavě. Po vytvrzení jedné vrstvy se základní deska posune směrem dolů o 0,126mm a celý proces se opakuje. Laser by měl ozařovat i předchozí vrstvu, aby došlo ke správnému propojení (viz. obr. 25). Nedostatečné ozáření vede k de-laminaci, v opačném případě k nadměrnému zkroucení. Před každou činností laseru se hladina pryskyřice setře stěračem, aby se zabránilo nepřesnostem vznikajících při nanášení polymeru. Pro složité modely s vnitřní geometrií je nutné použít tzv. podpory. Ty podepírají objekt

v kritických místech, kde by při tvorbě modelu hrozilo zborcení. Po výrobě modelu je nutné další vytvrzení pomocí UV záření (Post-processing). Konvenční metodou by se model vyráběl několik dní až týdnů; stereolitografie tuto dobu zkracuje na několik hodin.



Obr. 25 Princip tvorby vrstev bod po bodu [26]

Důležitým hlediskem je také vlhkost a teplota. Protože většina pryskyřic je nasákavá, jsou stroje SLA udržovány v klimatizovaných místnostech. Při nedodržení ideálních podmínek se zhoršuje rychlost fotopolymerace. Nedoctrvené díly ve vlhkém prostředí měknou. Při přepravě a dlouhém skladování se používají sušiva (silikagel).

Pokud nedojde k dovytvrzení modelu, ten se zkroutí. Zkroucení vzniká vlivem vnitřního pnutí a největší je v prvních dvou hodinách.

Tab. 9: Rozdělení materiálů [26]

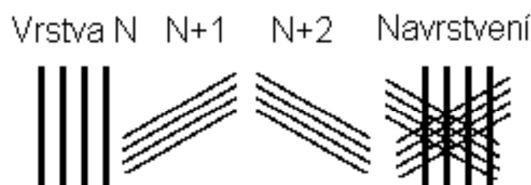
typ materiálu	vlastnosti
akryláty	starší materiál
	velká smrštivost
	menší přesnost
epoxidy	moderní materiál
	malá smrštivost
	lepší přesnost
plněné pryskyřice	moderní materiál
	malá smrštivost
	vyplňované organickými materiály, keramikou nebo kovy

Mechanické vlastnosti vybraných materiálů znázorňuje tab. 10. Měřeno při pokojové teplotě. Modul v tahu je poměr mezi namáháním a napětím. Maximální napětí je hodnota, při níž dojde k porušení materiálu. Poměrné prodloužení do prasknutí.

Tab. 10: Mechanické vlastnosti vybraných materiálů [26, 27]

materiál	modul v tahu [MPa]	maximální napětí v tahu [MPa]	poměrné prodloužení [%]
Accura SI 40	2840 - 3048	62	4,9 – 6,4
SL7560	2400 - 2560	40-62	6 – 15
Prototool	10100 - 11200	70-79	1,2 – 1,3
ABS (Terluran HH-106)	2400	51	9

Pro zlepšení vlastností modelu je možno vytvrzovat UV laserem v různých směrech vůči předchozí vrstvě. Děje se tak při natočení o 60°. Každá vrstva má tak sklon ke smrštění v jednom směru a celkový vliv se téměř eliminuje. Tento postup se nazývá: tvorba vrstev pomocí šrafů (viz obr. 25) [26, 27]



Obr. 26 Tvorba vrstev pomocí šrafů [26]

Výhody technologie SLA

- Masivní materiál
- Dobrá povrchová drsnost
- Velký stavební objem
- Vysoká přesnost (+/- 0.05mm)
- Dobré hodnocení procesu (hardware, software & materiály)

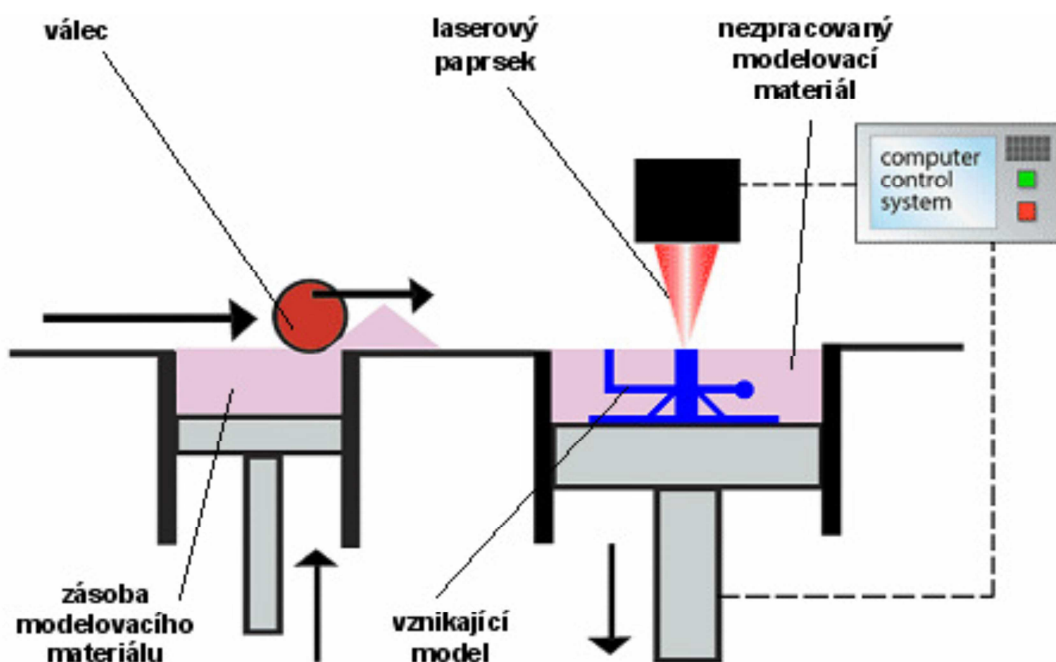
Nevýhody technologie SLA

- Je nákladné mít velkou vanu s pryskyřicí
- Uzavřené objemy (neumožňují odtok materiálu)
- Křehké díly
- Viditelné krokování vrstev
- Horší povrch/jakost bočních ploch
- Limitované materiály
- Tekutá SL pryskyřice je potenciální hazard
- Je zapotřebí další vytvrzování po vytvoření dílu (Post-processing) [28]

3.2 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

Metoda vyvinuta v roce 1989 v USA. SLS používá k výrobě modelu různých práškových materiálů. Ty jsou za pomoci CO_2 laseru slinovány (spékány). Metoda umožňuje využívat široké spektrum materiálů (nylon, sklo, keramika, nástrojová i nerezová ocel, bronz, titanové slitiny, kobalt-chrom-molybdenové slitiny, speciální kompozity aj.). Modely se svojí pevností rovnají konvenčně vyráběným. Na rozdíl od stereolitografie se zde nevyužívá podpůrné struktury (části jsou podepírány nepevněným práškem), jinak je to metoda velice blízká SLA.

V pracovním prostoru se nanáší vrstva po vrstvě v podobě prášku, který je za pomoci laserového paprsku slinován. Tloušťka vrstvy může být od 0,02 mm do několika desetin milimetru. Děje se tak, že prášek je v prostoru zahřán na teplotu pod bodem tavení a následně laser teplotu zvýší a dojde ke slinování. Z tohoto důvodu zařízení používá dva pracovní prostory. Z jednoho prostoru se prášek dopravuje do druhého, kde je zpracováván. Spékání se děje v inertoní atmosféře (dusík nebo argon). Po každém cyklu slinování dané vrstvy se model posune o tloušťku jedné vrstvy dolů a válec zažehlí nový prášek, který je připraven pro slinování laseru. Princip metody SLS je ukázán na obr. 27. [27, 28]



Obr. 27 Metoda SLS [27]

Dle použitého materiálu rozlišujeme několik metod. Ukázky na obr. 28:

Laser - Sintering Plastic: používají se plastické materiály jako nylon nebo polystyren. Metoda vhodná také při technologii lití do ztraceného vosku. Nylonové modely dosahují vysoký tvrdosti, houževnatosti a teplotní odolnosti;

Laser - Sintering Metal: používají se speciální kovové prášky. Hustota vyrobených součástí se pohybuje kolem 60 % teoretické hodnoty. Modely mají dostatečnou pevnost a mechanickou odolnost, hodí se k formování ve slévárenství. Součásti lze použít také jako formy pro výrobu plastových vylisků vstřikováním nebo lisováním;

Laser - Sintering Formsand: metoda používá jako materiál upravený slévárenský písek. Po vytvrzení je možno bez jakýchkoliv mezikroků vytvořit klasickou pískovou formu pro lití;

Laser - Sintering Ceramic: jako výchozí materiál se používá prášek. Ten se spojuje pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva zajišťuje Ink-Jet trysková hlava, která je vedena v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Touto metodou se dají vyrábět součástky z keramického prášku, formy a jádra pro technologii přesného lití;

Laser Micro Sintering: jako výchozí materiál se používá wolfram o velmi malé zrnitosti. Pro spékání prášku je použit Nd:YAG laser o výkonu 10 W. Jednotlivé vrstvy součástí mají tloušťku 0,03 mm. Vysoce kvalitní povrch až Ra 1,5 µm.

3-D Laser Cladding: jako výchozí materiál se používá kovový prášek, který se dodává plynule do stopy dopadu paprsku laseru, kde se taví. Proces probíhá v uzavřeném prostoru za přítomnosti inertního plynu. Vyrobené součásti mají hustotu a mechanické vlastnosti srovnatelné se součástmi vyrobenými konvenčními technologiemi. Jako prášku např. při výrobě velmi namáhaných modelů se používají titanové, niklové, kobaltové, hliníkové slitiny a novinkou je práškový materiál Ti6Al4V (lze použít i pro výrobu kyčelních kloubů). Výrobek má stejné hodnoty tažnosti a odolnosti proti únavě jako konvenčně používané tvářené materiály. [29]

Laser - Sintering Plastic



Laser - Sintering Metal



Laser - Sintering Formsand



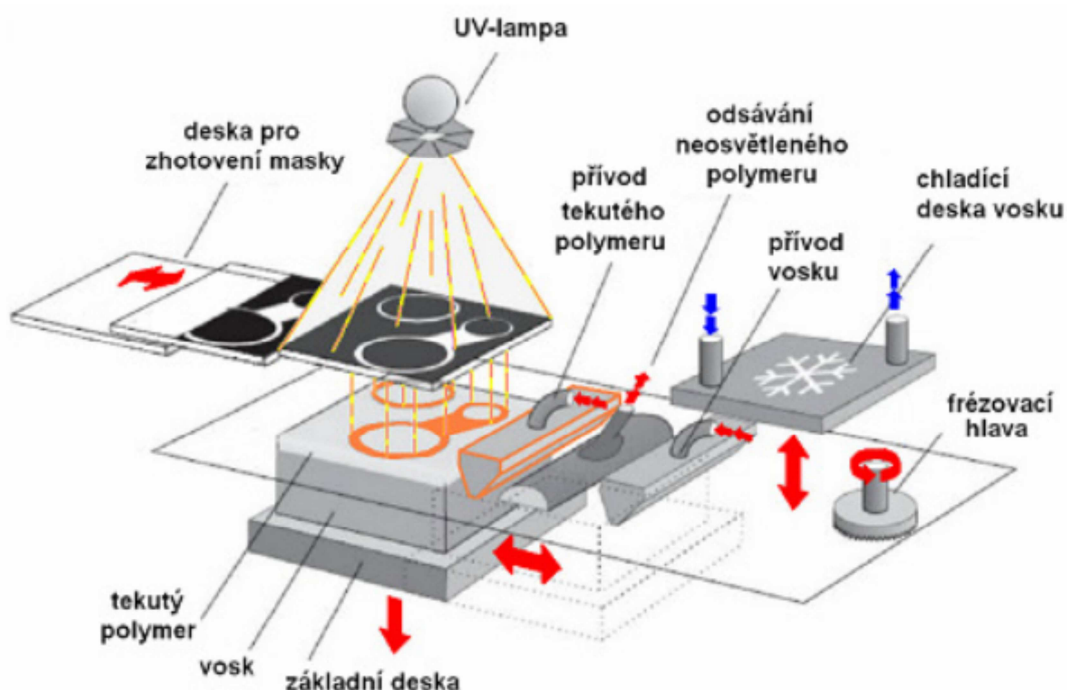
Obr. 28 Výrobky SLS [29]

3.3 SOLID GROUND CURING (SGC)

Systém SGC vyvinula Firma Cubital Ltd. V Izraeli v roce 1987. Materiál se používá tekutý a opticky vytvrditelný polymer jako u metody SLA. Princip výroby se však liší. Metoda SGC používá dva druhy materiálů. Primární- pryskyřice a sekundární- vosk pro podpory ve vnitřní geometrii. [28]

Zařízení této metody (obr. 30) vytváří z jednotlivých vrstev modelu „masky“. Přez ně ultrafialové světlo vytvrzuje fotopolymer. Masku nejčastěji tvoří skleněná deska, ve které je předem vyznačený tvar budoucí vrstvy. Děje se tak ikonografickým procesem nanášení speciálního toneru. Na desku je nanесena slabá vrstva fotopolymerní pryskyřice. Nad ní umístíme masku. Ultrafialové světlo (z lampy o výkonu 4kW) prostupuje jen obrysem masky a celá vrstva se tak vytváří osvětlením naráz, pryskyřice se vytvrdí. Po odstranění šablony se nevytvrzená pryskyřice vakuově odsaje. Místa, ze kterých byla odsáta pryskyřice, se vyplní voskem. Ten slouží jako podpora pro další vrstvu.

Vytvrzená vrstva se následně frézuje na požadovanou výšku a tím je připravena aplikace další vrstvy. Tak se dosahuje velmi vysoké přesnosti. Vosková výplň zůstává až do konce procesu tvorby modelu a je na závěr odstraněna tepelně nebo chemicky (kyselinou citronovou). Dokončená součást může být ještě závěrečně vytvrzována ozařováním speciální UV lampou. Princip metody znázorněn na obr. 31. [26, 28]



Obr. 30 Princip metody Solid Ground Curing [28]

Výhody technologie SGC

- minimální smrštění modelu
- dobrá struktura modelu
- dobrá stabilita modelu
- proces neprodukuje žádný zápach

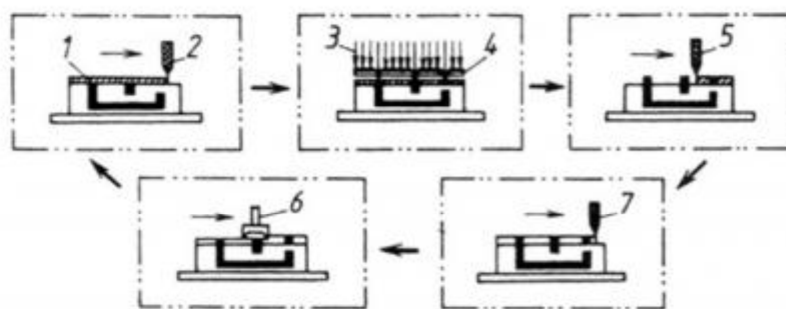
Nevýhody technologie SGC

- velké rozměry zařízení
- vysoká cena zařízení
- složitý proces
- nutná odborná obsluha
- drahý materiál
- problém s usazeninami vosku
- tvorba odpadu
- hlučnost zařízení [26, 28]

Velikost modelů, které lze v tiskárně vyrábět, je uveden v tabulce 11.

Tab. 11: Základní parametry modelu pro tiskárnu SGC [27]

Typ	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Tloušťka vrstvy [mm]	Přesnost [mm]
SGC 4600	350	350	350	1-2	±0,084
SGC 5600	500	350	500	1-2	±0,084



Obr. 31 Princip výroby modelu metodou SGC (1 – obrobek, 2 – nanášený fotopolymér, 3 – vytvrzování fotopolyméru osvětlením UV zářením, 4 – negativní maska, 5 – odstranění přebytečného fotopolyméru, 6 – fréza, 7 – nanášení vrstvy vosku) [30]

3.4 DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS)

Metoda DMLS využívá stavěcí kovový prášek mnoha druhů (ocel, titan, slitiny bronzu, kobalt, slitina bronz-nikl, nerez. ocel aj.). Jako podpůrný materiál je využit nespečený kovový prášek v okolí modelu. Prášek se pojí tavením laseru a není tedy nutné pojivo. Výroba modelu vzniká tak, že ze zásobníku se vyhrne vrstva prášku. Ta je na požadovaných místech spečena laserem. Po dokončení vrstvy se model posune o tloušťku vrstvy směrem dolů a celý proces se může opakovat.

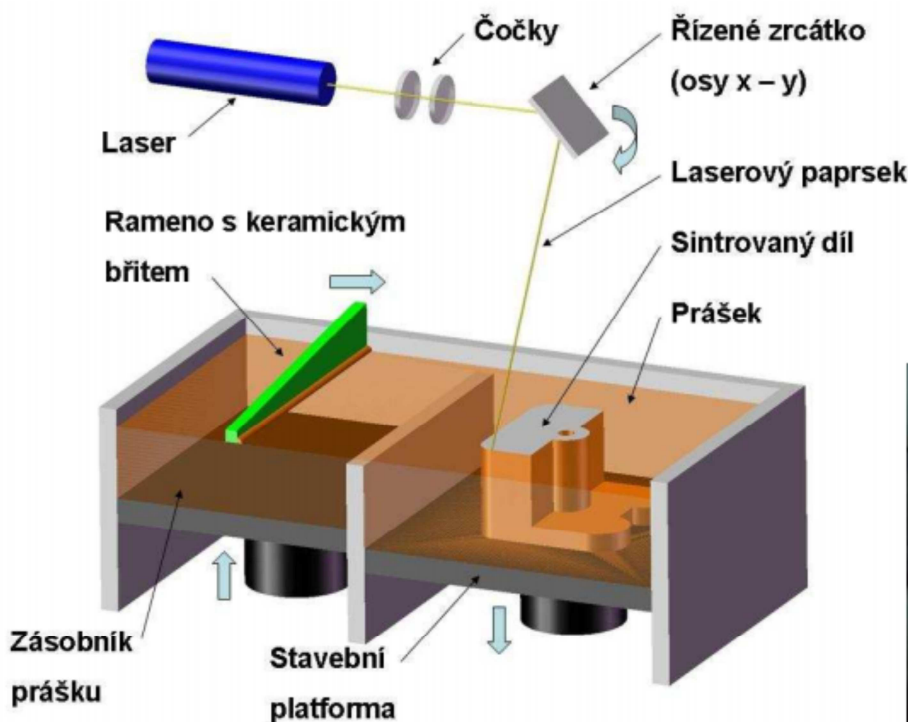
Výsledná model je vysoce odolný. Finálně se může upravovat tryskáním, obráběním, broušením a leštěním. Čištění modelu probíhá mechanicky, kdy se odstraňují podpory. Nespotebovaný prášek se z 98% dá znovu využít. Princip metody znázorněn na obr. 32.

Výhody technologie DMLS:

- pevnost modelu
- velké množství použitých materiálů
- široké možnosti nastavení softwaru (změny během tisku)
- výkonný laserový zdroj

Nevýhody technologie DMLS:

- Prostorově a energeticky náročné zařízení
- Nízká kvalita povrchu (velikost zrn prášku)
- cena laserového zdroje od 200.000,- po cca 1.800.000,- Kč
- nebezpečnost rozptýlení kovového prášku
- nutnost dokončovací operací – pórovitý povrch [26, 31]



Obr. 32 Princip metody DMLS [32]

3.5 3D PRINTING (3DP)

Technologii vyvinula americká společnost Extrude Hone. Výroba modelu se provádí slinováním práškových materiálů. Ty mohou být kovové, keramické, fermežové nebo kompozitní se speciálními pojivy. Metoda 3DP je založena na selektivním vrstveném inkoustovém tisku. Používá se principu Ink-Jet počítačových tiskáren. Tiskové hlavy mají vysoké rozlišení (až 600 x 540 dpi). Slinováním výrobku a jeho infiltrací kovem se dosahuje vysoké pevnosti a téměř 100% hustoty. Při závěrečném tepelném zpracování dochází k vyhoření pojiva, slinutí kovových prášků na porézní strukturu. Ta se zpevňuje infiltrací kovu. [30]

Proces tvorby začíná importováním STL souboru do softwarového rozhraní. Z vany se rozprostře vrstva prášku a tiskovou hlavou se na ní nanese pojivo. Zbývající neslinutý prášek zde slouží jako podpora. Po tvorbě celé vrstvy se model posune o tloušťku vrstvy směrem dolů a celý proces se opakuje.

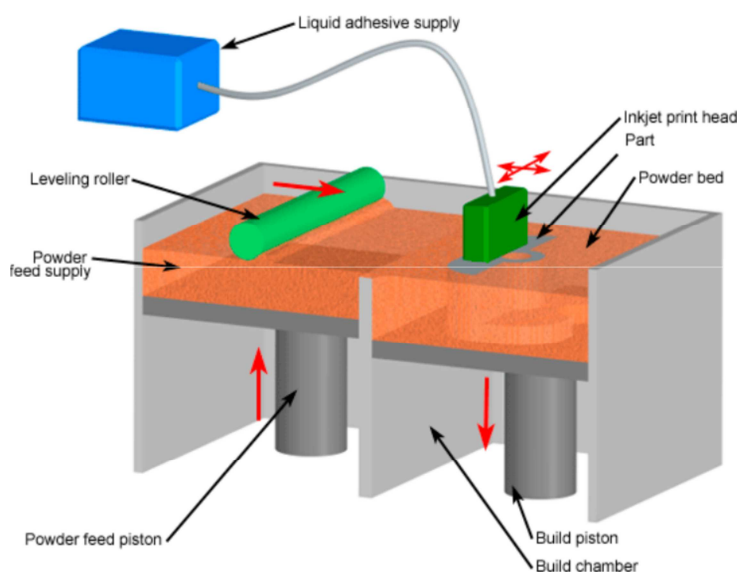
Jedná se průmyslově o nejrychlejší zařízení na výrobu prototypů. Používá se zde 24-bitová barevná technologie. Odstranění přebytečného prášku se provádí na automatickém odprašovacím a vibračním zařízení. Pro zlepšení mechanických vlastností se povrch modelu může ošetřovat speciálními infiltranty (nanáší se pomocí štětce nebo se ponořují do lázní). Vyrobený model dosahuje pevnosti v tahu až 10 MPa. Lze vyrábět i velmi tenké stěny a přesné detaily. Touto metodou lze rovněž vyrábět formy pro odlévací nebo vstřikovací technologie. Princip metody znázorněn na obr. 33. [26, 27]

Výhody:

- průmyslově nejrychlejší zařízení na výrobu prototypů
- 24 bitová barevná technologie
- recyklace až 80% přebytečného prášku
- vysoce zátěžové materiály (až 10 MPa pevnosti v tlaku)
- tenkostěnné modely, velmi přesné detaily

Nevýhody:

- poměrně drahé materiály (pojivo, prášek, ...)



Obr. 33 Princip metody 3DP [32]

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o výrobě trvalých modelů ve slévárenství. V úvodní části práce jsou uvedeny požadavky na trvalé modely důležité pro volbu materiálu a technologie výroby. Mezi hlavní požadavky patří životnost modelu, která udává počet jeho zaformování. To znamená, kolik netrvalých forem se vyrobí jedním modelem při zachování požadované kvality odlitku. Na životnost má vliv materiál modelu a způsob formování.

V první části práce jsou popsány jednotlivé materiály, ze kterých lze trvalý model vyrábět. Jejich hlavní výhody, nevýhody, způsoby zpracování a přípravy pro výrobu. Za poslední dobu, s uplatněním poznatků vědy a techniky, byly vyvinuty nové materiály (např. kompozity), jiné byly zdokonaleny větší stabilitou jejich složení nebo používáním přísad. Větší pozornost je věnována dřevu z důvodu jeho nesporných výhod a stále největšímu využití v modelárnách v České republice.

Dále pak je uveden přehled průmyslově nejpoužívanějších metod rychlého prototypování, jejich principy a hlavní výhody a nevýhody. Krátký čas, ve kterém jsou RP metody schopny zhotovit model, je hlavní výhodou těchto metod. Výhody procesu také rostou s tvarovou komplexností. To znamená, čím je geometrie modelu složitější, tím jsou technologie rychlého prototypování ekonomicky výhodnější.

Za posledních 20 let slévárenství pokročilo směrem k výrobě odlitků se zvýšenou přesností a jakostí. Na modelárny jsou vyvíjeny stále větší nároky. Významným aspektem je i tlak na snižování cen odlitků a modelů a minimalizaci negativního vlivu na životní prostředí. Došlo k masovému využívání informační techniky. Ta umožňuje vyrábět odlitky s minimem vad, bez otřepů, výronků a snižuje se podíl dokončovacích prací, což má opět vliv na přesnost modelových zařízení. Významné změny přineslo zavedení technologie CAD/CAM a obrábění na CNC strojích. Vytvořenou součást pomocí těchto metod lze rychle analyzovat s možností simulace chování materiálů při odlévání nebo vstřikováním. Informační technologie zejména usnadnily vývoj slévárenského modelu, čemuž pomáhají i technologie rychlého prototypování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SLIMSHADY. Teorie - Slévarenství: Teorie základních slévarenských prvků, které by měl každý slévač znát. In: *Teorie slévarenství - Všechno co musíme znát ... : blog - GamePark.cz* [online]. Allstar Group s.r.o., 2011 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: http://www.gamepark.cz/teorie_slevarensti_vsechno_co_musime_znat_645477.
2. STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE: slévarenství. In: *Index of /studenti/texty* [online]. 26.8.2012 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/kap4.pdf
3. ZAJÍČEK, Oldřich. Nové technologie mění výrobu modelů. *Slévarenství: časopis pro slévarenský průmysl*. 2004, LII, č. 10, s. 393-394.
4. Konstrukce 3D modelu. In: *Modelárna - NEMOŠICE s.r.o.* [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://www.modelarna.com/images/obr/1305020671_asn3784.jpg
5. P. L. JAIN. *Principles of Foundry Technology*. Tata McGraw-Hill Education, 1. 4. 2003. 4. ISBN 9780070447608. Dostupné z: http://books.google.cz/books/about/Principles_of_Foundry_Technology_4_e.html?id=NOotk64Grx0C&redir_esc=y
6. Model odlitku s vtokovou soustavou a jaderníky. In: *Nasazení CAD systému ve slévárně* [online]. 2006 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/38/3816.jpg>
7. Dřevěný model. In: *Flanging Punch Patterns* [online]. 13.3.2010 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://www.skysailor.org/CH701/Flanging%20Punch/Pics/Wood%20Pattern/IMG_0989.JPG
8. Kovový model. In: *Cryogenics in the Foundry* [online]. 2009 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.metal-wear.com/picts/Transmission%20Case%20Pattern.jpg>
9. Sádrový model. In: *Hydro Power Cone - Foundry Pattern - Foundry Patterns & Coreboxes - Sand, Plaster, Permanent Mold - Accurate Pattern, Inc.: Gallery* [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://www.accuratepattern.com/gallery/albums/userpics/10001/normal_hydro_power_cone_-_foundry_pattern.JPG
10. Kovový model. In: *Quality Non Ferrous Foundry Plaster for sale from non ferrous alloy manufacturer of item 40436127* [online]. 16.12.2011 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://img.tjskl.org.cn/pic/z24b84f9-300x300-1/non_ferrous_foundry_plaster.jpg

11. HERMAN, Aleš. *Učební texty k předmětu 2332016 Nástroje pro výrobu polotovarů* [online]. Praha : [s.n.], 2009 [cit. 2011-04-14]. Nástroje pro výrobu odlitků-modelová zařízení materiály, výroba, s . . Dostupné z WWW: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/NVPO/modelova_zarizeni_1.pdf>.
12. *Dřevo / Moravskoslezský dřevařský klastr* [online]. 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.msdk.cz/projekty/op-vk-oblast-podpory-1-1-zvyšování-kvality-ve-vzdělávání/o-projektu/zajímavosti-ze-světa-dřeva/dřevo/>
13. Sušení dřeva – odřevě.cz. *Atom kanál odřevě.cz.* [online]. 2010, 4. 5. 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://odreve.cz/wiki/Su%C5%A1en%C3%AD_d%C5%99eva
14. *Woodplastic - Wikipedie* [online]. 2013, 23. 3. 2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Woodplastic>
15. *Wood-Plastic Composites(WPC) Profile Extrusion Machine, Wood-Plastic Composites(WPC) Profile Extrusion line-Qingdao Ruijin Plastic Machinery Co., Ltd.* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: [http://www.wonderfulextruder.net/sheet-extrusion/Wood-Plastic-Composites\(WPC\)-Profile-Extrusion-Machine-7.jpg](http://www.wonderfulextruder.net/sheet-extrusion/Wood-Plastic-Composites(WPC)-Profile-Extrusion-Machine-7.jpg)
16. Technologie studeného nástřiku. In: *MM Průmyslové spektrum: strojírenský měsíčník přinášející aktuální informace z tuzemska i ze zahraničí* [online]. 2012 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-technologie-vyroby-targetu.html>
17. E. JOSTEN. *Dřevo a jeho obrábění*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2010. ISBN 0081-5993.
18. S. PROKEŠ. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. Praha: SNTL, 1965.
19. Galvanické pokovení. In: *ÚSTAV ANORGANICKÉ TECHNOLOGIE - VŠCHT PRAHA* [online]. 2006 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/kat/download/lab_galvanicke_pokoveni.pdf
20. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie* 3. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-718-3337-1.
21. *Šablonování do sádry* [online]. 2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.finehomebuilding.com/assets/uploads/posts/8479/plaster-medallion-05_lg.jpg

22. LENFELD, Petr. *Technická univerzita Liberec: Katedra strojírenské technologie- skripta* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/obsah.htm
23. *Rozdělení a vlastnosti: Rozdělení plastů a jejich průmyslové zpracování* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://ucivozs.web.cz/plast2.html>
24. *WIPO modelárna* [online]. 2008 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.wipo.cz/ce/produkty.htm>
25. *Rubber pattern* [online]. Forte Trinity, 1999 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.turbotech.co.uk/_includes/images/global/rubber-pattern.jpg
26. *Aditivní technologie: metody Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_tech_nologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
27. *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping učební text* [online]. Liberec, 2012 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
28. *Příručka pro výuku Rapid Prototyping (RP): Rozvoj odborných kompetencí žáků v oblasti CA technologií* [online]. Ing. Pavel Hájek [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.spsr.cz/projekty/plm/rp2012.pdf>
29. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl: 9 Rapid prototyping*. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-9-dil.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
3D	-	trojrozměrný
3DP	-	3D Printing (3D tisk)
Al	-	hliník
C	-	uhlík
CAD	-	Computer Aided Design (Počítačem podpořený návrh)
CAM	-	Computer Aided Manufacturing (Počítačem podporovaná výroba)
CO ₂	-	oxid uhličitý
Cu	-	měď
DMLS	-	Direct Metal Laser Sintering (přímé kovové laserové spékání)
EDM	-	Electrical Discharge Machining (elektrojistrové obrábění)
FDM	-	Fused. Deposition Modeling (modelování tavením)
Fe	-	železo
KCl	-	chlorid draselný
Mg	-	hořčík
NaCl	-	chlorid sodný
SA	-	Stereolithography (Stereolitografie)
SLS	-	Stereolithography (Stereolitografie)
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Konstrukce 3D modelu [4]	8
Obr. 2: Model odlitku s vtokovou soustavou a jaderníky [6]	9
Obr. 3: Výkres modelu, model a jaderník s jádrem [2]	10
Obr. 4: Dřevěný model [7]	11
Obr. 5: Kovový model [8]	11
Obr. 6: Sádrový model [9]	11
Obr. 7: Plastový model [10]	11
Obr. 8: Složení dřeva	12
Obr. 9: Složení dřeva [12]	13
Obr. 10: Příčné borcení dřeva [11]	15
Obr. 11: Podélné borcení dřeva [11]	16
Obr. 12: Laminátové desky [11]	17
Obr. 13: WPC [15]	17
Obr. 14: Schéma stříkací pistole pro studený nástřik [16]	18
Obr. 15: Okování jaderníku [11]	18
Obr. 16: Šablonování do sádry [21]	23
Obr. 17: Model z epoxidové pryskyřice [24]	25
Obr. 18: Kaučukový model [25]	26
Obr. 19: Výroba modelu z termoplastu [22]	26
Obr. 20: Postup výroby od CAD modelu po prototyp [27]	27
Obr. 21: Vrstvení materiálu [27]	27
Obr. 22: Různé velikosti 3D tiskáren [26]	28
Obr. 23: Vývoj a proces vzniku součásti metodou RP [26]	29
Obr. 24: Stereolitografie [26]	30
Obr. 25: Princip tvorby vrstev bod po bodu [26]	31
Obr. 26: Tvorba vrstev pomocí šrafů [26]	32
Obr. 27: Metoda SLS [27]	33
Obr. 28: Výrobky SLS [29]	34
Obr. 30: Princip metody Solid Ground Curing [28]	35
Obr. 31: Princip výroby modelu metodou SGC [30]	36
Obr. 32: Princip metody DMLS [32]	37
Obr. 33: Princip metody 3DP [32]	38

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1: Značení modelů	10
Tab. 2: Rozdělení dřeva dle tvrdosti	13
Tab. 3: Obsah vlhkosti dřeva při sušení na vzduchu	14
Tab. 4: Průměrné hustoty vybraných dřev	16
Tab. 5: Vlastnosti kovových materiálů	20
Tab. 6: Doba tvrdnutí sádry	23
Tab. 7: Plasty dle chemického složení	24
Tab. 8: Používané materiály pro jednotlivé metody RP	29
Tab. 9: Rozdělení materiálů	31
Tab. 10: Mechanické vlastnosti vybraných materiálů	32
Tab. 11: Základní parametry modelu pro tiskárnu SGC	36