



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**DESKRIPCE POUŽITÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU
VE SLÉVÁRENSTVÍ**

DESCRIPTION OF APPLICATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN THE FOUNDRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Polášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Bradáč, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Ondřej Polášek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. František Bradáč, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Deskripce použití technologie 3D tisku ve slévárenství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem bakalářské práce je provést rešerši nasazení 3D tisku v oblasti slévárenství a to primárně pro výrobu modelů, forem a jader. Výsledkem práce bude popis jednotlivých technologií, kinematických struktur zařízení a pojivových systémů, které se používají v dané oblasti.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rešerši a porovnání strojů a jejich kinematik používaných pro 3D tisk v oblasti výroby slévárenských modelů, jader a forem.
2. Provedte rešerši a porovnání pojivových systémů a způsobů vytvrzování používaných pro 3D tisk v oblasti výroby slévárenských modelů, jader a forem.
3. Porovnejte varianty získané z bodů 1 a 2.
4. Na základě systémové analýzy jednotlivých variant proveďte výběr vhodného konstrukčního uspořádání.
5. Vytvořte zjednodušený 3D model vybrané varianty.

Seznam doporučené literatury:

STRATASYS, <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/sand-casting/>, přístup 30.9.2016

VOXELJET, <http://www.voxeljet.de/en/services/sand/>, přístup 30.9.2016

3DPrinting, <http://3dprinting.com/3dprinters/s-max-industrial-sand-casting-3d-printer-by-exone/>, přístup 30.9.2016

KANG, Jin-wu a Qiang-xian MA, 2017. The role and impact of 3D printing technologies in casting. China Foundry [online]. 14(3), 157-168 [cit. 2017-11-22]. DOI: 10.1007/s41230-017-6109-z. ISSN 1672-6421. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s41230-017-6109-z>

ANTONELLI, Matt, Ian KNUDSON, Allison POPERNACK a Avalon SCHULER, 2016. Cast Aluminum Mesostructures Using 3D Printed Sand Cores with an Encapsulation. International Journal of Metalcasting [online]. 10(1), 111-113 [cit. 2017-11-22]. DOI: 10.1007/s40962-015-0011-5. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40962-015-0011-5>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá možnostmi použití 3D tisku v oblasti výroby slévárenských modelů, forem a jader. Shrnuje jak prolínání 3D tisku s konvenčními výrobními metodami, tak i nekonvenční výrobní metody. V případě nekonvenčních metod se poté práce zaměřuje na typy pojivových systémů a kinematická uspořádání běžně používaných strojů. Na základě získaných poznatků je na závěr vytvořen zjednodušený 3D model stroje pro výrobu slévárenských forem a jader.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with possibilities of using 3D printing in the field of production of foundry models, moulds and cores. It summarizes both the blending of 3D printing with conventional production methods and unconventional manufacturing methods. In the case of unconventional methods, the thesis also focuses on types of binder systems and kinematic settings of commonly used machines. On the basis of the acquired knowledge, a simplified 3D model of the machine for the production of foundry moulds and cores is created.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní výroba, tisk slévárenských forem a jader, pojivový systém.

KEYWORDS

Additive manufacturing, printing of moulds and cores for casting, binder system.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁŠEK, O. *Deskripce použití technologie 3D tisku ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Bradáč, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Františkovi Bradáčovi, Ph.D za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Také bych rád poděkoval panu Ing. Liborovi Horáčkovi za obohacující exkurzi v modelárně Liaz s. r. o.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Bradáče, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Ondřej Polášek

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	POUŽITÍ 3D TISKU V RŮZNÝCH ODVĚTVÁCH SLÉVÁRENSTVÍ	17
2.1.	Trvalý model	17
2.1.1.	Popis technologie.....	17
2.1.2.	Používané technologie	18
2.2.	Netrvalý model	20
2.2.1.	Popis technologie.....	20
2.2.2.	Použitelné technologie.....	20
2.3.	Tisk pískových forem	22
2.3.1.	Popis technologií	22
3	TISK PÍSKOVÝCH FOREM A JADER.....	25
3.1.	Potenciál tisku pískových forem.....	25
3.1.1.	Trussové konstrukce	25
3.1.2.	Náhrada výroby slévárenských jader vštřelováním.....	25
3.2.	Stručný přehled dodavatelů 3DP technologií	26
3.2.1.	ExOne	26
3.2.2.	Voxeljet	27
4	ROZBOR TECHNOLOGIÍ SLS A 3DP Z HLEDISKA KINEMATIK.....	29
4.1.	SLS.....	29
4.2.	3DP	30
5	ROZBOR POJIVOVÝCH SYSTÉMŮ	31
5.1.	SLS.....	31
5.2.	3DP	31
5.2.1.	Pojivové systémy	31
5.2.2.	Písek.....	32
6	POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ SLS A 3DP, VOLBA VHODNÉHO KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ.....	35
6.1.	Porovnání z hlediska rychlosti tisku	35
6.2.	Porovnání z hlediska pojivových systémů a vytvrzování	37
6.3.	Volba vhodného konstrukčního uspořádání	37
7	ZJEDNODUŠENÝ 3D MODEL TISKÁRNY PRO TISK SLÉVÁRENSKÝCH FOREM A JADER.....	38
8	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	41
9	ZÁVĚR.....	43
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
11	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	49
11.1	Seznam tabulek.....	49
11.2	Seznam obrázků.....	49
12	SEZNAM PŘÍLOH	51

1 ÚVOD

Slévárenství obecně spočívá v lití roztaveného kovu do formy, jejíž dutina má tvar budoucího odlitku. Již v době bronzové si naši předci vytvářeli tímto způsobem zbraně, nářadí nebo také šperky. Nejstaršími, ovšem dodnes stále hojně používanými způsoby výroby forem jsou metoda výroby pískové formy pomocí trvalého modelu a metoda výroby keramické skořepiny obalováním vytavitelného modelu.

Postupem času se slévárenské metody začaly zdokonalovat a rozšiřovat. Metoda vytavitelného modelu dnes představuje odvětví tzv. přesného lití za vzniku tvarově velmi přesných odlitků. Výroba forem pomocí trvalého modelu lze pro změnu z velké části automatizovat. Kov lze do forem dopravit pouze vlivem gravitační síly, ovšem pro lepší vlastnosti odlitku lze také využít tlakové lití, nízkotlaké lití, nebo také odstředivé lití.

S rozvojem průmyslu rostou požadavky na přesnost a kvalitu odlitků. Tyto parametry může podstatně ovlivnit nasazení technologií 3Dtisku. Ty totiž nemají téměř žádná tvarová omezení a je možné tisknout materiály, použitelné pro trvalé i netrvalé modely. Dnes existují také stroje schopné tisknout celé pískové formy bez jakýchkoli nástrojů, nebo modelů. To bude mít pravděpodobně veliký vliv na tvorbu odlitků v budoucnosti a celkovou revoluci ve slévárenství.

2 POUŽITÍ 3D TISKU V RŮZNÝCH ODVĚTVÁCH SLÉVÁRENSTVÍ

2.1 Trvalý model

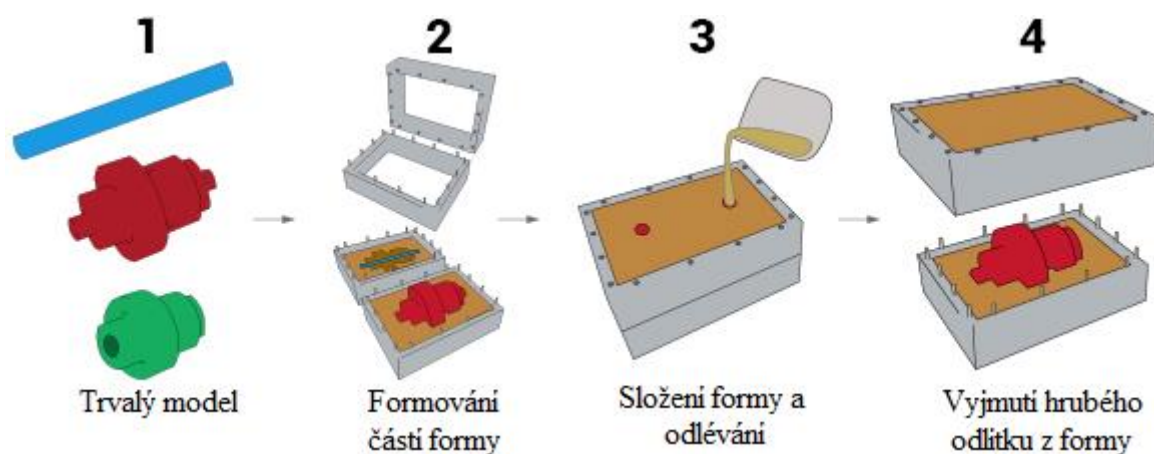
2.1.1 Popis technologie

Odlévání do netrvalých forem, vytvořených pomocí trvalého modelu, je jednou z nejstarších a dodnes jednou z nejpoužívanějších metod výroby odlitků. Spočívá v upěchování formovací směsi do rámu kolem modelu, který je poté z formy vyjmut. Do dutiny vzniklé po modelu je možné vložit jádra pro vytvoření dutých odlitků. Mezi další náležitosti nově vznikající formy patří také vtoková soustava a nálitky, případně také průduchy a výfuky pro odvod plynů, vzniklých při odlévání. [1]

Pěchování probíhá ručně, nebo strojně, např. pěchování střešáním, vstřelováním, metáním, lisováním atd. Všechny tyto operace mají za následek silové působení formovací směsi na povrch modelu. Tím dochází k opotřebení modelu, a je tedy zapotřebí, aby měl model na povrchu dostatečnou tvrdost. Materiál modelu se proto volí s ohledem na použitý druh formovací směsi a způsob pěchování. [1]

Materiálem modelu bývá dřevo, kov, nebo plast. U dřevěných modelů se jedná zejména o dub, javor, jasan apod., kovové modely bývají většinou slitiny hliníku nebo železa. Jak dřevo, tak kov však mohou být v některých aplikacích s výhodou nahrazeny plasty. Ty jsou odolnější vůči chemickému působení pojiv, mají dobrou otěruvzdornost a oproti dřevu nemají tendenci absorbovat vlhkost. Navíc je možné plastové modely rychle a efektivně vyrábět lisováním, nebo vstřikováním do forem. Epoxidové pryskyřice, polyuretan a polyvinylchlorid jsou nejčastěji použity pro výrobu modelu. Čím je komplikovanější tvar budoucího odlitku, tím náročnější je výroba formy pro výrobu plastového modelu. S ohledem na tvarovou komplikovanost a sériovost výroby je dobré vzít v úvahu aditivní výrobu. [1]

Na rozdíl od třískového obrábění, lisování a vstřikování, aditivní výroba vytváří 3D objekty vrstvením materiálu, přičemž každá vrstva má tvar příčného průřezu vznikajícího modelu. Proto není zapotřebí ani drahých lisovacích forem, nebo obráběcích center, což je nespornou výhodou. Přesnost 3D tisku se pohybuje v desetinách milimetru, což je dostačující s ohledem na to, že u odlitku jsou funkční plochy opatřené přídávky materiálu. [2]



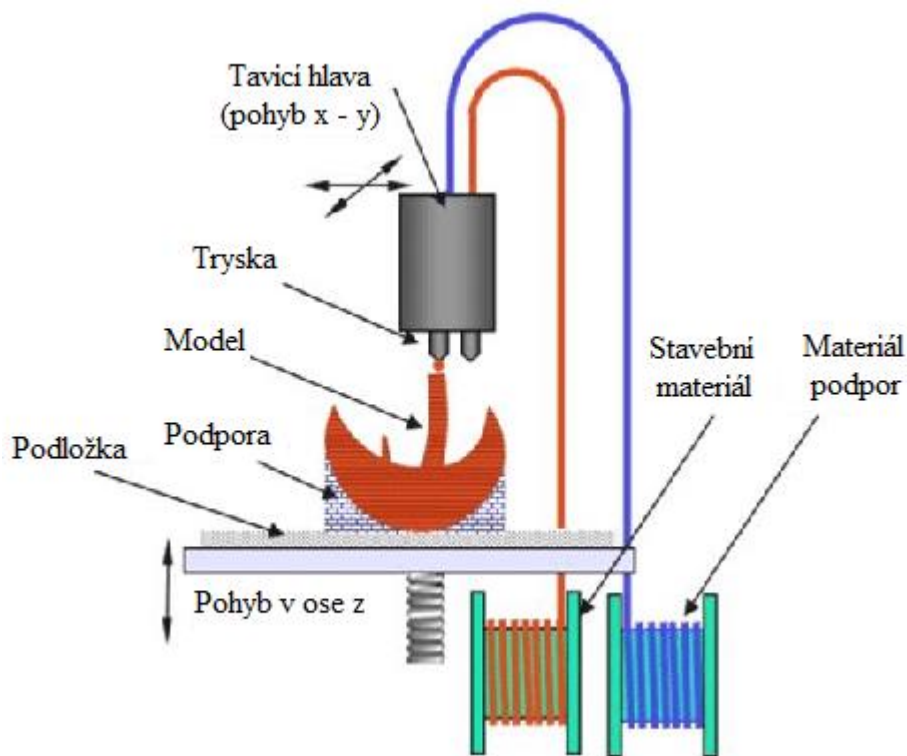
Obr. 1) Schéma technologie odlévání podle trvalého modelu. [19]

2.1.2 Používané technologie

Technologie FDM (Fused deposition modeling)

Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější metodu 3D tisku. Tisknutým materiálem je termoplast ve formě drátu tzv. filamentu. Ten je nejprve nahříván a poté extrudován tryskou do jednotlivých vrstev. Během tisku koná tryska pohyb v rovině rovnoběžné s podložkou a po dokončení vrstvy se posune nahoru o výšku další vrstvy. Pro převislé části je nutné během tisku tvořit podpory, které jsou po tisku odstraněny. [3]

Modely vytisknuté pomocí metody FDM trpí při větším dynamickém namáhání tzv. směrovostí, proto je vhodné model před formováním obrousit a natřít povlakem proti abrazi. Pro následné formování může být vytisknut púlený, nebo nepúlený model, případně může být vytisknuta část modelové desky. [3]

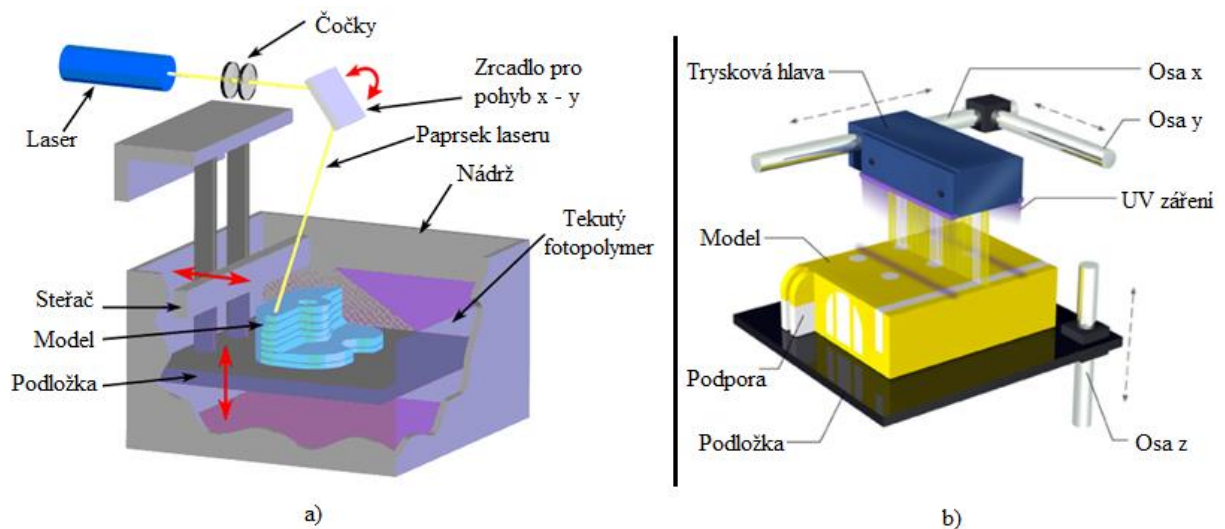


Obr. 2) Schéma metody FDM [20]

Technologie SLA (Stereolitografie) a PolyJet

Stereolitografie je využívána pro výrobu modelů z fotopolymeru. Ten je na počátku tisku v tekuté formě v lázni. K jejímu ztuhnutí v jednotlivých průřezech je použit ultrafialový laser. Jelikož je paprsek velmi tenký, výrobky mají velmi detailní povrch. Během tisku je nezbytná tvorba podpor pro prvky, které by bez nich od modelu odpadly. Po tisku je nutné model vytvrdit působením UV záření. [3]

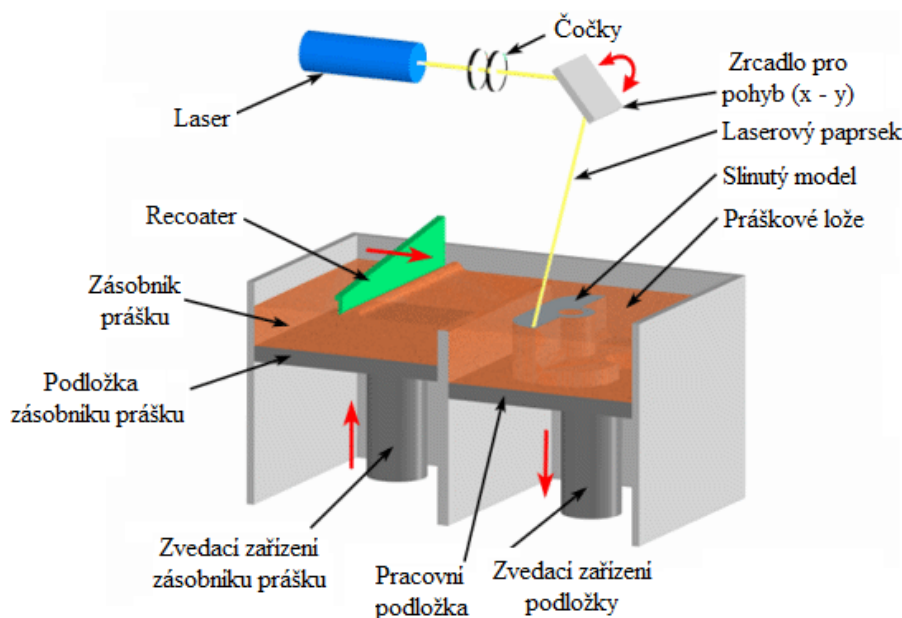
PolyJet pracuje stejně jako SLA s fotopolymerem, vytvářeným UV zářením. Fotopolymer je po vrstvách nanášen na podložku pomocí tiskové hlavy s tryskami. Součástí hlavy je také zdroj UV záření, který průběžně vytvrzuje již nanesený materiál. Oproti SLA dokáže tato technologie tisknout tenčí vrstvu (až 16 mikrometrů), kvůli tomu je ovšem pomalejší a je doporučena spíše pro menší součásti. [10]



Obr. 3) Schéma metod SLA (a) a PolyJet (b) [21]

Technologie DMLS (Direct metal laser sintering)

Jak napovídá název, technologie funguje na principu spékání kovového prášku výkonným laserem. Jemný prášek je nanášen do tenkých vrstev, ve kterých je poté laserem slinut příčný průřez vznikajícího modelu. Nespečený prášek v tzv. práškovém loži plní během tisku funkci podpor, díky tomu lze vytvářet i velmi tvarově složité součásti, které by nebylo možné vytvořit pomocí konvenčních výrobních metod. Bohužel tato metoda má svá úskalí, a to omezenou škálu materiálů mikrostruktura je porézní a technologie je celkově nákladná a časově náročná. I tak je možné ji využít pro výrobu modelu k formování do písku. [3]



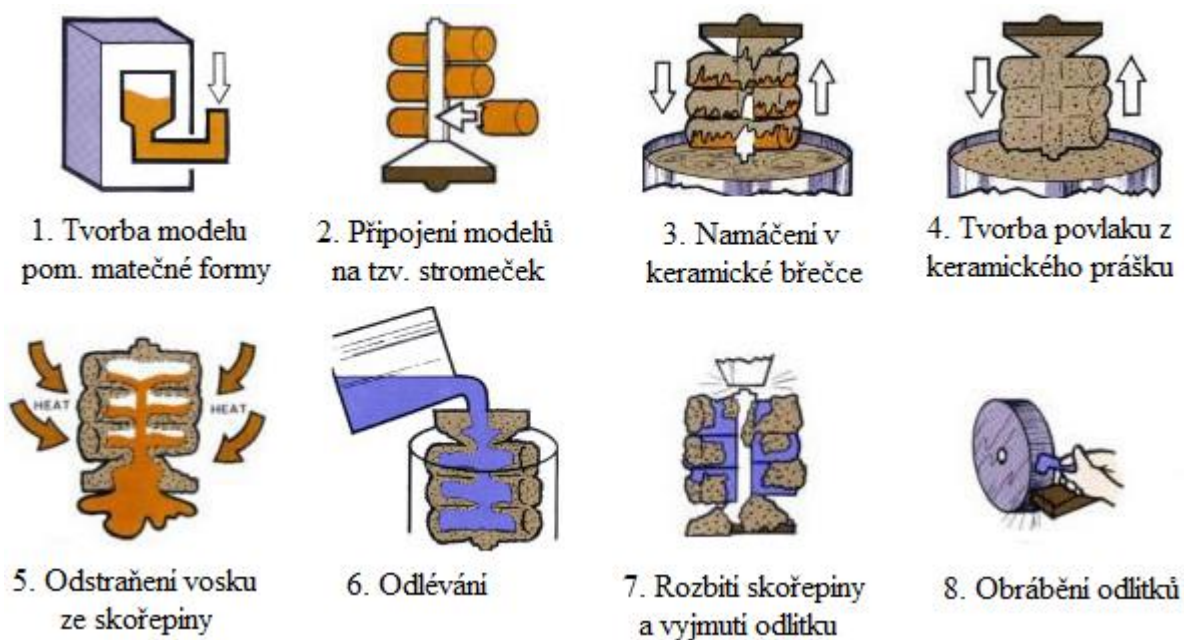
Obr. 4) Schéma metody DMLS [22]

2.2 Netrvalý model

2.2.1 Popis technologie

Technologie odlévání s využitím vytavitelného modelu je známá již několik tisíciletí a spadá do kategorie přesného lití. Na začátku je zapotřebí vytvořit model, nejčastěji voskový, nebo plastový. Voskové modely se vytvářejí pomocí tzv. matečných forem, plastové se lisují, nebo vstřikují. Model je poté obalován vrstvami keramiky, která bude později sloužit jako forma k samotnému odlévání. Po nanesení dostatečného počtu vrstev keramiky je nutné provést keramizační žíhání, při kterém dojde ke slnutí a ztvrdnutí keramiky. Při žíhání zároveň dochází k vytavení vosku resp. k vypálení plastu. Až po odstranění modelu je možné do skořepiny odlévat. [1]

I v této technologii lze uplatnit aditivní technologie. Samotná matečná forma pro voskové modely bývá často vyrobena z epoxidové pryskyřice, ovšem může být i plastová, proto lze formu vyrobit například metodou FDM, nebo SLA. Pro kusovou výrobu lze vzít také v úvahu použití FDM i pro tisk samotného modelu. Při tisku plastu ovšem během odstraňování modelu zůstávají ve skořepině spaliny, které mají nežádoucí vliv na povrch odlitku. Proto je lepší pro FDM využít voskový filament. V případě sériové výroby je lepší využít technologii QuickCast, SLS a 3DP. [4]



Obr. 5) Schéma technologie vytavitelného modelu. [23]

2.2.2 Používané technologie

QuickCast

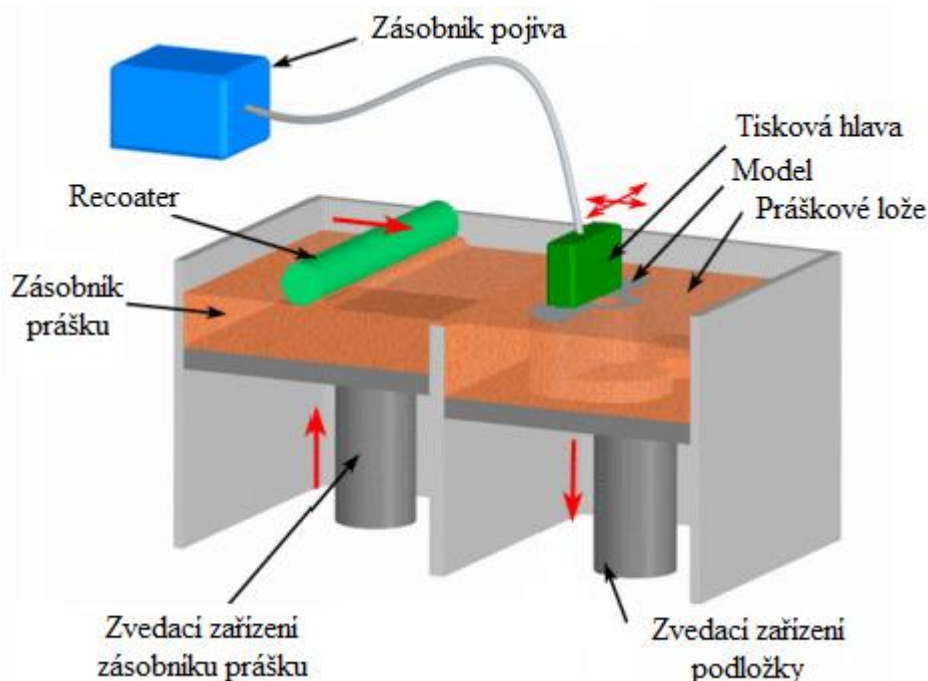
Jedná se o technologii fungující na principu SLA. Hlavní rozdíl je v tom, že není tisknut celý model, ale jen tenká slupka vyplněná speciální vnitřní strukturou. Ta umožňuje zborcení modelu dovnitř při ohřevu, takže při odstraňování ze skořepiny nedojde k jejímu puknutí. Nevýhodou technologie je rychlé stárnutí následované zkrěhnutím modelů. [2]

SLS (Selective laser sintering)

Jedná se o předchůdce DMLS, liší se hlavně v technických parametrech. Je při ní použit slabší laser, protože namísto kovu je slinován vosk, nebo termoplast. Produktivitu této technologie určuje převážně rychlost pohybu laseru, velikost bodu laseru a tloušťka vrstvy. Čím menší je bod laseru, tím je tisk přesnější, ale také pomalejší. Jelikož bod laseru musí slinout celý průřez v každém jednotlivém bodě, je tato metoda časově náročná a málo využívaná. [2]

3DP (3 dimensional printing)

Stejně jako SLS a DMLS i 3DP využívá práškového lože. Pro vytavitelné modely se nejčastěji používají polymer PMMA (známý také jako plexisklo), který má vlastnosti termoplastu, a PCC² (PolyPor C2), s obdobnými vlastnostmi jako u PMMA ovšem s detailnějším rozlišením modelů. Prášek je ve vrstvách spojen pojivem, které na něj nanáší tisková hlava. Proto se této technologii říká binder-jetting. Tisk jedné vrstvy probíhá velmi podobně jako tisk jedné strany v inkoustové tiskárně. V obou případech se nad tisknutou plochou pohybuje tisková hlava, která pomocí trysek nanáší inkoust/pojivo. Stejně jako u inkoustových tiskáren, i zde hrozí zasychání pojiva ve tryskách tiskové hlavy, proto po několika vytisknutých vrstvách a po skončení tisku proběhne automatické čištění. Po tisku je nespojený materiál odstraněn a později znovu použit pro další tisk. Při odstraňování PMMA polymeru zůstává ve skořepinách minimální množství spalin, což zvyšuje kvalitu a přesnost odlitku. V současné době je například možné vytisknout prostor o rozměrech 4000 mm x 2000 mm x 1000 mm za 20 hodin. [2, 11]



Obr. 6) Schéma metody 3DP [24]

2.3 Tisk pískových forem

2.3.1 Popis technologie

Předchozí dvě podkapitoly byly zaměřeny na možnosti použití 3D tisku v konvenčních slévárenských technologiích. U obou byl nejprve vytvořen model, podle modelu byla vytvořena forma a následovalo odlévání. V případě tisku z práškového materiálu a přidáním vhodného pojiva lze vytvořit namísto modelu rovnou formu nebo jádro. Pro tisk lze využít technologie SLS a 3DP, které již byly popsány v předchozí kapitole. [4]

V případě 3DP je možné použít to stejné zařízení, které bylo použito pro tisk vytavitelných modelů. Je ovšem nutné celou tiskárnu vyčistit a poté PMMA prášek nahradit pískem vhodným pro odlévání a změnit typ pojiva.

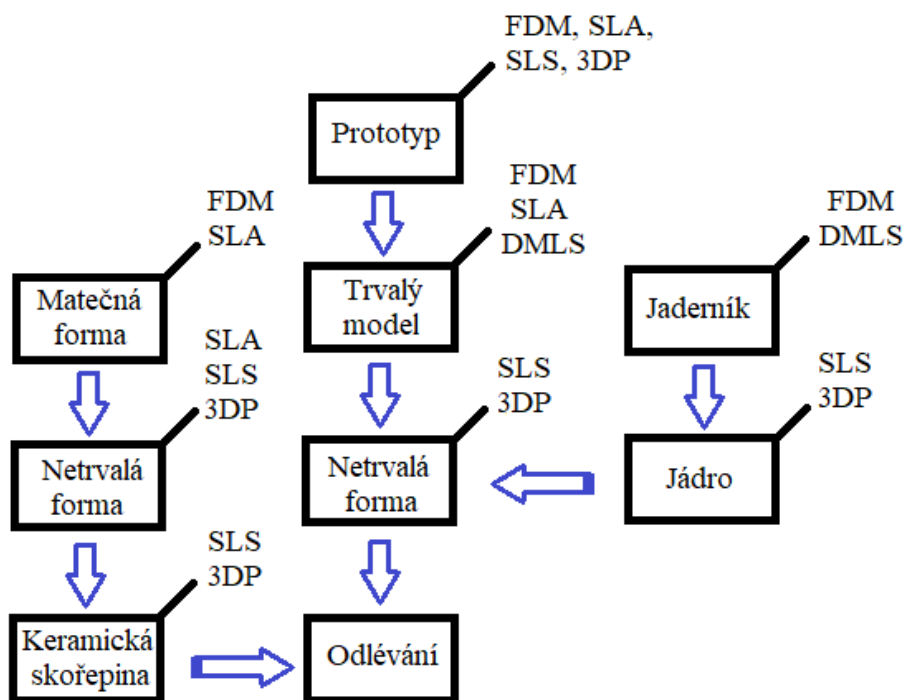
U SLS je použit písek potažený pryskyřicí, který poté speče laser. Takové formy ovšem po vytištění mají poměrně malou pevnost. Aby dosáhly pevnosti vyšší než 2 MPa, je nutné následně dát formy do pece na dotvrzení. Při určování potřebného množství pojiva je nutné vzít v úvahu, že jeho část spálí při spékání laser. Při následném vytvrzování v peci roste pevnost s teplotou až do okamžiku, než dojde k hoření pojiva. Poté rychlost rapidně klesne a nelze do ní odlévat. [8]

Technologie SLS je starší než 3DP, zároveň je také pomalejší v důsledku pomalého spékání vrstvy pomocí paprsku. Komplikovanější je i z hlediska písku, jelikož ten musí obsahovat i pojivo. Z toho důvodu jsou pískové formy a jádra z valné většiny vytvářeny na 3DP tiskárnách. [2]

Jelikož není k výrobě formy zapotřebí model, odpadá čas výroby modelu a náklady na materiál modelu, případně nástrojů k jeho výrobě. Jediné nezbytné věci jsou CAD data modelu. Za pomoci CAD softwaru je vymodelována forma/jádro. Je nezbytné zvětšit rozměry formy resp. zmenšit rozměry jádra, jelikož při odlévání dochází ke smršťování kovu. S ohledem na velikost a komplexnost odlitku je vhodné zvážit, zda rozdělit formu na dvě, nebo více částí. U jednodílných forem by bylo obtížné odstranění nespojeného písku z dutin. Oproti pískovým formám, vytvořeným pomocí trvalého modelu nemají vzniklé odlitky technologické úkosity. Jelikož tisk probíhá v práškovém loži, je možné vytvořit i převísle struktury. Více se problematice budou věnovat následující kapitoly. [2, 5]



Obr. 7) Písková forma vytvořená tiskárnou S-MAX (ExOne)



Obr. 8) Shrnutí aplikací 3D tisku v různých slévárenských odvětvích. [2]

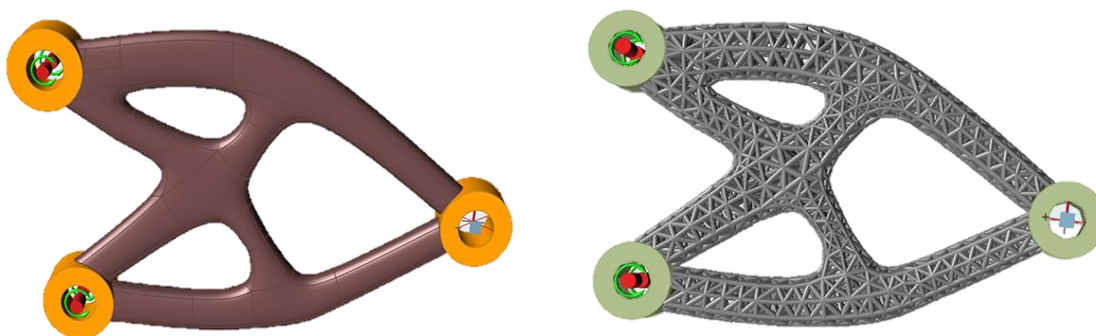
3 TISK PÍSKOVÝCH FOREM A JADER

3.1 Potenciál technologie

3.1.1 Trussově konstrukce

Jak již bylo zmíněno, technologie s práškovým ložem nemají téměř žádná tvarová omezení pro vytvořené formy. Díky tomu je možné vyrobit velmi komplikované odlitky, které by nebylo možné vyrobit jinou slévárenskou metodou, nebo obráběním. Příkladem toho jsou komplikované trussově konstrukce. Jak je vidět na obrázku, jedná se o velmi složitou vnitřní strukturu, tvořenou mřížkami, které by nebylo možné vytvořit obráběním ani tvářením. V úvahu ještě přichází použití metody DMLS, nebo metody vytavitelného modelu. V tom případě by ovšem velmi vzrostla výrobní cena a u takto komplikované struktury by navíc hrozilo nedostatečné odstranění modelu a následné puknutí skořepiny při odlévání. [2, 9]

Výhody trussově konstrukce jsou jak úspora materiálu, tak i dobré mechanické vlastnosti. Součásti tvořené z jemné mřížky mají vynikající poměr vlastní hmotnosti vůči nosnosti konstrukce. Příkladem využití mřížkových struktur může být například Eiffelova věž, ovšem díky aditivním výrobním metodám jsme schopni vyrobit mřížkové konstrukce v mnohem menším měřítku. Lze vyrobit základní stavební jednotky (nejčastěji kostka nebo kvádr) ze kterých je poté sestavena větší součást, ovšem praktičtější využití nalézá výroba celé součásti jakožto mřížkové struktury. Výjimkou jsou funkční plochy, které musí zůstat plné. Moderní programy pro vytváření modelů obsahují nástroje pro vygenerování pravidelné mřížkové struktury, nebo nepravidelné struktury vycházející z napěťové analýzy budoucího dílu. Díky tomu lze vyrobit lehkou součást, která má výjimečné mechanické vlastnosti. [2, 9]



Obr. 9) Optimalizace dílu pomocí vygenerované mřížky. [25]

3.1.2 Náhrada výroby slévárenských jader vstřelováním

V dnešní době je nejběžnějším způsobem výroby slévárenských jader vstřelování. Jádra vytvořená na vstřelovacím stroji mají dobrou rozměrovou přesnost, mechanické vlastnosti a mohou mít velmi komplikovaný tvar. Nejčastěji používané metody jsou Cold Box, Hot Box a Croning. [1]

Výroba jader probíhá prudkým vstřelováním jádrové směsi do jaderníku, kde dojde k jejímu ztvrdnutí. V každém jaderníku vzniká jedno jádro, které je po ztvrdnutí vyjmuto a uskladněno. K výrobě se používají jak jednoplošové, tak víceplošové vstřelovací stroje. Při použití jednoplošových strojů je problémem nízká produktivita. U víceplošových strojů

s více jaderníky vzniká větší množství jader zároveň, čímž je proces značně efektivnější. Stále je ovšem rychlost výroby ovlivněna časem míchání směsi, samotným vstřelováním a časem tuhnutí. I u vícepolohových strojů je tedy najednou vyráběn jen malý počet jader. [1]

Dalším problémem jsou náklady na jaderník. Jelikož je do něj prudce vstřelována jádrová směs, dochází u něj k rychlému opotřebení. Poté je nutná výměna, přičemž nový jaderník musí splňovat rozměrové tolerance, musí mít technologické úkosy pro snadné vyjmutí jader, a proto také někdy musí být jádro rozděleno na více částí, což má nepříznivý vliv na přesnost rozměrů složeného jádra. Kvůli tomu bývají jaderníky poměrně drahé. [1]

Již v minulé kapitole bylo zmíněno, že při tisku forem a jader nejsou zapotřebí žádné nástroje pro vytvoření modelu, nebo v případě výroby jader jaderníky. Také není nutné, aby jádro mělo technologické úkosy, a nemá tedy téměř žádná tvarová omezení. To lze vidět například u tištěného jádra Francisovy turbíny – Obr. 10). Jelikož je jádro vytištěno jako jeden kus, odpovídá přesnost jádra přesnosti tisku, který je například u tiskárny ExOne S-MAX roven 0,3 mm. Další nespornou výhodou je možnost výroby velkého množství jader současně a poměrně rychle. V rámci 20 hodin je možno v pískovém loži o objemu 8 m³ vytvořit veliké množství jader. Pokud je použit pojivový systém, u kterého není nutné tepelné zpracování, stačí jádra vyjmout z lože, očistit, případně přidat nátěr pro zlepšení kvality povrchu dutiny odlitku a může se přejít k samotnému odlévání. Tato metoda tedy vyrábí rychle velký počet jader, a pokud je nutné upravit tvar jádra, není zapotřebí vyrobit nový jaderník, ale jen změnit vstupní CAD soubor. [2, 6]



Obr. 10) Tištěné jádro pro Francisovu turbínu. (Voxeljet) [26]

3.2 Stručný přehled poskytovatelů 3DP technologií

3.2.1 ExOne

Historie firmy začíná v roce 1999, kdy byla v rakouském Augsburgu založena firma Generis. Do roku 2003 se zabývala vývojem strojů pro výrobu netrvalých modelů a odlévání do písku. Poté se společnost rozdělila na ProMetal RCT, která se zaměřila na výrobu strojů pro tvorbu pískových forem, a Voxeljet. Odnož firmy ProMetal RCT poté začala rozvíjet trh pro tisk pískových forem a jader. V roce 2004 představila firma tiskárnu schopnou tisknout s více materiály a pojivy. V roce 2005 změnila firma název na ExOne, ta v roce 2010 představila tiskárnu S-MAX (Obr. 11), v té době největší stroj pro tisk pískových forem (rozměry pískového lože 1800 x 1000 x 700 mm). [12]

V dnešní době má firma pobočky v Americe, Asii a Evropě. Zabývá se jak tiskem pískových forem a jader, tak i výrobou netrvalých modelů a prototypovou výrobou. Používá širokou škálu materiálů jako je křemičitý písek, keramika, nerezová ocel, bronz a sklo. ExOne je dodavatelem systému pro výrobu prototypů, systémů pro produkční výrobu a systémů pro výzkum a vzdělání. [12]



Obr. 11) Tiskárna ExOne S-MAX [27]

3.2.2 Voxeljet

Jak již bylo zmíněno, firma Voxeljet vznikla v roce 2003 po oddělení od firmy Generis. Na rozdíl od firmy ProMetal RCT se zpočátku zabývala výrobou strojů pro tvorbu netrvalých modelů a prototypů. Firma, původně fungující v rámci Evropy, se v roce 2014 rozšířila do Ameriky a v následujícím roce do Číny a Indie. Od roku 2003 vytvořila firma řadu tiskáren VX, založených na obdobném principu 3DP tisku pro různé objemy práškového lože. [13]

Stejně jako ExOne, produkuje i Voxeljet pískové formy, netrvalé modely a prototypy. V dnešní době se firma může pyšnit největší komerčně vyráběnou tiskárnu pro tisk forem a jader – VX4000 (Obr. 12) o objemu práškového lože 8 m³. Taktéž vyrábí zatím jedinou komerčně vyráběnou tiskárnu pro kontinuální tisk – VXC800. Tiskárny VX mohou vytisknout produkty z písku, plastu i keramiky. V roce 2017 také představila zcela nový způsob 3D tisku – HSS (high speed sintering), pomocí kterého lze vyrábět jak flexibilní prototypové díly, tak i hotové součásti s vysokou rozměrovou přesností. [13]



Obr. 12) Tiskárna Voxeljet VX4000 [28]

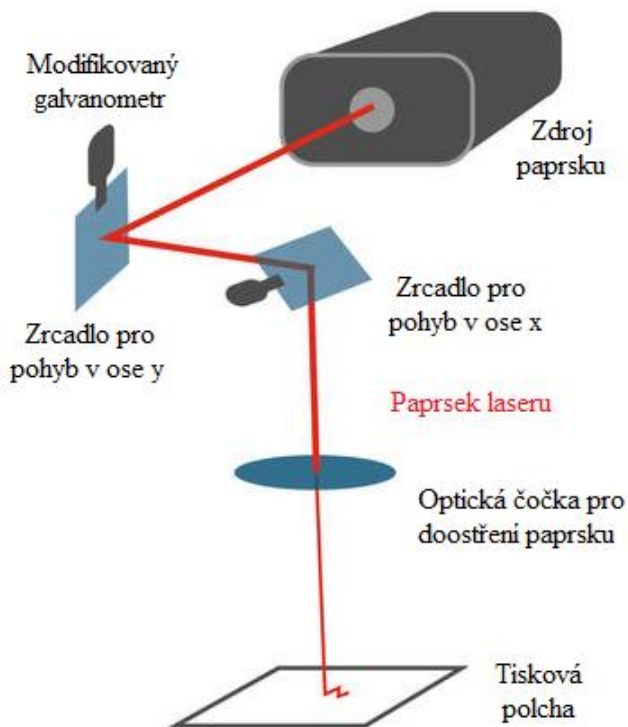
4 ROZBOR TECHNOLOGIÍ SLS A 3DP Z HLEDISKA KINEMATIK

4.1 SLS

U SLS tiskáren je tisk realizován pomocí laseru. K jeho nasměrování je použito zrcadel, která svým natáčením mění trajektorii paprsku. Ta mohou být poháněna krokovými motory, servomotory, nebo modifikovanými galvanometry. Aby na slinovaný prášek dopadal pouze tenký paprsek, je použito optických čoček. U nich musí být možnost zaostřit paprsek na různé vzdálenosti, jelikož vzdálenost od zrcadla k prášku se průběžně mění. [4, 8]

Kromě mechanismu pro pohyb zrcadel je zapotřebí mechanismus pro průběžné nanášení nové vrstvy prášku. Nanášení lze provést dvěma způsoby. Prvním je nanášení ze zásobníku, který má ústí ve stejné rovině jako je tisková plocha. Při každém snížení práškového lože se zvedne dno zásobníku a na ústí vystoupí prášek. Ten je poté do nové vrstvy dopraven pomocí odvalujícího válce, který zajistí rovnoměrnou výšku vrstvy. Druhý způsob spočívá v nanášení pomocí menšího zásobníku (šnekového dopravníku), který přejíždí nad tiskovou plochou. Z něj se průběžně sype prášek do tenké vrstvy. Pro rovnoměrný nános prášku je uvnitř zásobníku šnek, plynulý tok prášku je zajištěn vibrováním části zásobníku. Těmto zařízením se také říká „recoatery“. [4, 8]

Poslední pohyb, nezbytný pro uskutečnění tisku, vykonává dno pískového lože. To se po dotisknutí vrstvy musí posunout směrem dolů o výšku další vrstvy. Tento pohyb bývá často realizován pomocí pohybových šroubů. [4]



Obr. 13) Mechanika nasměrování paprsku laseru [29]

4.2 3DP

Metoda 3DP využívá taktéž práškové lože a pohyb dna je realizován obdobným způsobem. Na rozdíl od SLS využívají 3DP stroje převážně šnekové dopravníky. Tyto dopravníky jsou připojeny k mísicímu zařízení, v kterém je promíchán nový písek s recyklovaným pískem z předchozích tiskových operací a případně s aktivátorem pro lepší ztvrdnutí formy. Aktivátor může být také nanášen pomocí tiskové hlavy, společně s pojivem. [14, 15]

Šnekový dopravník je na začátku tisku každé vrstvy naplněn potřebným množstvím písku pro alespoň jednu vrstvu, poté přejede přes tiskovou plochu a nanese vrstvu prášku. Po nanesení vrstvy se musí vrátit zpět, aby uvolnil prostor pro pohyb tiskové hlavy. [14, 15]

Tisková hlava je uchycena na vedení, které umožňuje lineární pohyb, celé toto vedení je poté připevněno k druhému vedení, které se vůči směru prvního vedení pohybuje kolmo. Tak je možno tisknout v rovině tisku, někdy také značené rovině $x - y$. Pro přívod pojiva, elektrické energie a případně aktivátoru je součástí vedení energetický řetěz. [14, 15]

ExOne i Voxeljet u svých strojů mají vedení šnekového dopravníku a vedení tiskové hlavy rovnoběžné, díky tomu mohou být stroje kompaktnější. Samotné vedení poté může být umístěno nad rovinou tisku, tím lze částečně předcházet vnikání částic písku do vedení a jeho zadírání. [14, 15]



Obr. 14) Tisková hlava (ExOne S-MAX)



Obr. 15) Šnekový dopravník [30]

5 ROZBOR POJIVOVÝCH SYSTÉMŮ A ZPŮSOBŮ VYTVRZOVÁNÍ

5.1 SLS

Pro tisk pískových forem pomocí této metody je zapotřebí jako prášek použít písek potažený pryskyřicí. Křemičitý písek potažený fenolovou pryskyřicí je použit pro dobrou slučitelnost s roztavenými kovy. Povlakování písku začíná jeho předehřevem, následuje smíchání s pryskyřicí, která obalí písková zrna. Poté je písek chlazen během přepravy na dopravníku a proset přes síta. Po následné kontrole může být použit pro slinování pískových forem. [8]

Před slinováním je zapotřebí zahřát písek na teplotu 60-70 °C pro urychlení procesu. Zároveň předehřev předchází případnému posuvu již slinutého průřezu při nanášení nové vrstvy písku. Díky tomu je také zvýšena rozměrová přesnost vznikající formy. [2, 8]

Při samotném slinování dojde vlivem teploty dříve ke spojování zrn písku, než k polymerizaci pryskyřice. Ta je ovšem nutná k získání dostatečné pevnosti formy. Pevnost po slinutí laserem je menší než 1 MPa, proto je nutné vytvrdit formu v peci. Během vytvrzování dojde k polymeraci pryskyřice a forma má po vyjmutí z pece a vychladnutí pevnost 3-6 MPa. Teplota vytvrzování je zásadní parametr pro kvalitu formy. S rostoucí teplotou roste i pevnost formy, ovšem při přehřátí dojde k hoření pryskyřice a pevnost rapidně klesne. Teplota také ovlivňuje množství plynu, které se při odlévání roztaveného kovu uvolní z formy. Plyn uvnitř formy má nežádoucí efekt na kvalitu odlitku a je tedy žádoucí co nejmenší objem uvolněného plynu. Množství uvolněného plynu klesá s rostoucí teplotou, proto je zapotřebí formu vytvrdit na co nejvyšší teplotu, aniž by došlo k hoření pojiva. [2, 8]

5.2 3DP

Na rozdíl od slinování písku s povlakem je zde použit čistý písek. Ke spojení jsou využívána jak organická, tak anorganická pojiva přivedená tryskou. Současně s pojivem může být do tisknuté vrstvy nanášen také tzv. inhibitor – látka sloužící k vytvoření ochranné atmosféry při odlévání velmi hořlavých a snadno oxidujících slitin hořčíku. [2, 7]

Volba pojivového systému a použitého písku závisí na odlévané slitině, požadavcích na rozměrovou přesnost zakázky, výslednou kvalitu povrchu atd. Jak ExOne, tak i Voxeljet dnes využívají různé pojivové systémy a písky, případně jejich kombinace. [16, 17]

5.2.1 Pojivové systémy

Furanové pojivové systémy

Furanové pojivo je typ pojiva bez tepelného vytvrzování, tj. samotuhnoucí pojivo. K jeho vytvrzení je zapotřebí aktivátor, kterým bývá roztok kyseliny arylsulfonové. Furanové samotuhnoucí směsi jsou běžně využívány i v konvenčních slévárenských metodách, takže nejsou nutná žádná přizpůsobení slévárny. Pevnost forem se pohybuje kolem 2,3 MPa. Výhodou furanových pojiv je možnost odlévat téměř ihned po očištění forem od nespojeného písku. To probíhá přibližně 3 hodiny po dokončení tisku. Na přiloženém obrázku lze vidět výsledná struktura povrchu odlitku odlitého do tištěné formy s furanovým pojivovým systémem. Také lze vidět vliv tloušťky stěny odlitku na zatékání kovu (nejtenčí část 4 mm). [16, 17]



Obr. 16) Odlitek pro test min. tloušťky stěny

Fenolové pojivové systémy

Fenolová pojiva jsou uzpůsobena pro odlévání kovů s vysokou teplotou tavení. Díky tomu lze dosáhnout lepšího zatékání kovu do úzkých částí formy. Odlitky tedy mohou mít velmi tenkou stěnu. Na rozdíl od furanových pojiv je nutné tepelné vytvrzení po tisku. To lze snadno provést v zařízení, fungujícím obdobně jako mikrovlnná trouba. Firma Voxeljet také nově vytvrzuje formy pomocí zdroje infračerveného záření, umístěného na šnekovém dopravníku. Pevnost forem po vytvrzení je 2,5-5 MPa a závisí na použitém písku. [16, 17]

Pojivový systém na bázi silikátu

Pojivo na bázi silikátu bylo vytvořeno jakožto ekologicky přijatelnější pojivo, jelikož při jeho výrobě a následné manipulaci nevznikají nežádoucí emise, ani zápach. Na rozdíl od furanových a fenolových pojiv se jedná o anorganické pojivo, konkrétně o křemičitan sodný (vodní sklo). To je v práškové formě smícháno s pískem a poté nanášeno pomocí šnekového dopravníku. Na suchou směs je poté tryskami nanášena voda o upravené viskozitě a povrchovém napětí. Při kontaktu vody s křemičitanem sodným dojde k rozpuštění vodního skla, které je schopno obalit okolní zrna písku. Vytvoří se pojivové můstky a po následném ohřevu dojde k vypaření vody a vytvrzení formy. Takto vytvořené formy jsou vhodné pro lehké kovy. [16]

5.2.2 Písek

Křemičitý písek

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů písku na světě. Pro jeho dostupnost není překvapením, že je hojně využíván ve slévárenství. Formy a jádra z křemičitého písku mají dobrou propustnost vzduchu, čímž předcházejí puknutí forem vlivem tlaku plynů, uvolněných uvnitř formy při odlévání. Výhodou je také to, že jej lze použít se všemi třemi výše zmíněnými pojivovými systémy. Vedle cenové dostupnosti a dobré propustnosti má křemičitý písek i několik negativních vlastností. Křemičitý písek (oxid křemičitý) je totiž kyselá látka, tudíž má tendenci reagovat se zásaditými slitinami (oceli legované manganem). Jeho teplota tání je 1700 °C, ovšem za nižších teplot u něj dochází k polymorfním přeměnám a tedy i k objemovým změnám. Také špatně odvádí teplo a tím způsobuje pomalejší chladnutí a menší rozměrovou stabilitu. [1, 18]

Cerabeads

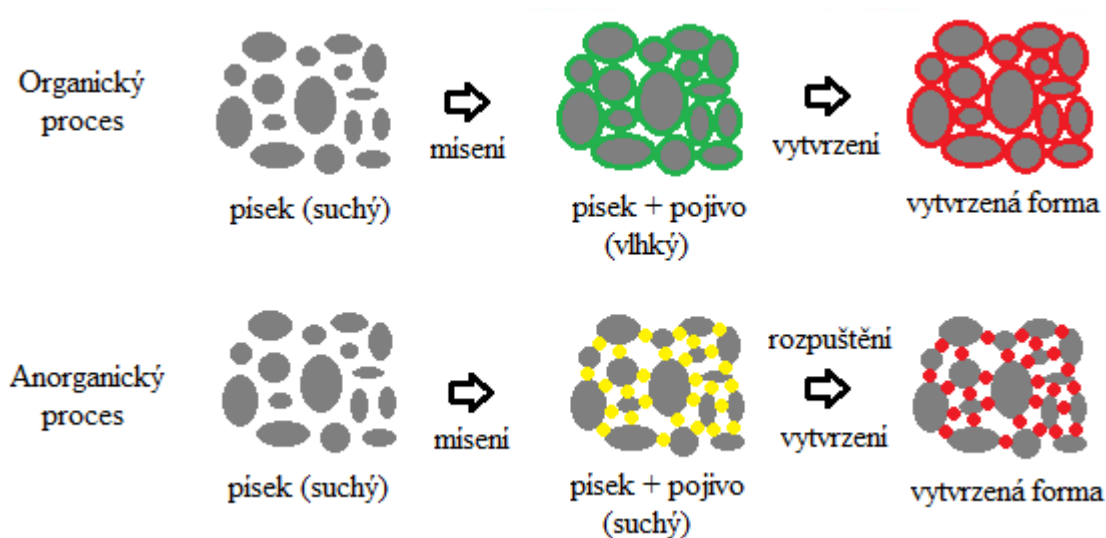
Synteticky vytvořený, keramický písek sférického tvaru má mnoho vynikajících vlastností pro výrobu forem a jader. Dobře odolává vysokým teplotám a zachovává rozměrovou přesnost. Vykazuje také dobrou propustnost plynů a tím je zamezeno pórovitosti povrchu odlitků. Zrnitost je srovnatelná s křemičitým pískem, pohybuje se kolem 200 μm . Cerabeads lze použít se všemi pojivy a je doporučen pro použití pro slitiny s vysokou teplotou tavení. [17, 18]

Chromit

Chromitový písek se běžně vyskytuje jakožto spinel (kombinace chromu a oxidů železa). Jako materiál formy skvěle odvádí teplo a přispívá k vynikající rozměrové přesnosti. Může být použit pro velké, ocelové i litinové odlitky. Lze použít samotný chromitový písek, případně jej lze v rámci úspor smísit s křemičitým pískem. V obou případech mají odlitky díky rychlému odvodu tepla jemnější mikrostrukturu a tedy lepší mechanické vlastnosti. Je doporučen pro odlévání speciálních legovaných ocelí. [18]

Zirkon

Zirkon se běžně vyskytuje v podobě plážového písku. Jeho vysoká teplota tavení (2500 $^{\circ}\text{C}$), nízká teplotní roztažnost a vysoká tepelná vodivost jsou klíčové pro jeho využití. Odlitky mají vynikající kvalitu povrchu a jemnou strukturu. Kvalita povrchu je způsobena nízkou smáčitelností zirkonu. Stejně jako chromit lze mísit s křemičitým pískem pro snížení nákladů. [18]



Obr. 17) Schéma mikrostruktury při vytvrzování [7]

6 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ SLS A 3DP, VOLBA VHODNÉHO KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ.

6.1 Porovnání z hlediska rychlosti tisku

Jelikož tiskárna SLS spojuje materiál formy pomocí rychle se pohybujícího bodu paprsku a 3DP nanáší pojivo v jeden okamžik na větší ploše, je nutné rychlosti obou přepočítat na myšlenou jednotkovou plochu, aby bylo možné porovnat plošnou rychlost tisku.

U tiskárny 3DP byla jednotková rychlost vyjádřena pomocí celkového času potřebného na vytisknutí celého práškového lože. Z celkového času t_c a počtu vrstev n byl vyjádřen čas na tisk jedné vrstvy t_1 , z toho byl poté vyjádřen čas potřebný na spojení myšleného průřezu o obsahu 1 m^2 . Jako vstupní hodnoty výpočtu byly použity parametry tiskárny ExOne S-MAX.

Tab 1) Vstupní parametry výpočtu [14]

3DP (ExOne S-MAX)		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Rozměry práškového lože (<i>délka x šířka x výška</i>)	1800 x 1000 x 700	[mm]
Celkový čas t_c	54000	[s]
Tloušťka vrstvy p	0,5	[mm]

Výpočet

Počet vrstev n :

$$n = \frac{\text{výška}}{p} = \frac{700}{0,5} = 1400 \quad (1)$$

Čas tisku jedné vrstvy t_1 :

$$t_1 = \frac{t_c}{n} = \frac{54000}{1400} = 40 \text{ s} \quad (2)$$

Čas tisku vztažený na metr čtverečný t :

$$t = \frac{t_1}{\text{šířka} \cdot \text{délka}} = \frac{40}{1,8 \cdot 1} = 22,2 \text{ s/m}^2 \quad (3)$$

Výpočet plošné rychlosti tisku SLS vycházel z optimálních hodnot tisku, získaných ze studie, zaměřené právě na tisk pískových forem pomocí laseru a písku potaženého pryskyřicí (v seznamu literatury č. 8). Ve studii byl uveden optimální průměr bodu laseru a optimální rychlost pohybu paprsku. Jelikož paprsek musí v myšleném průřezu slinout každý bod, byla myšlená plocha (taktéž 1 m^2) pomocí průměru bodu laseru přepočtena na celkovou dráhu, kterou musí laser vykonat. Průběžné změny rychlosti pohybu paprsku byly zanedbány a bylo počítáno s průměrnou rychlostí, tedy optimální rychlostí pohybu paprsku.

Tab 2) Vstupní parametry výpočtu [8]

SLS (optimální hodnoty)		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Průměr bodu laseru Φ	1,3	[mm]
Rychlost pohybu paprsku v	25000	[mm/s]
Tloušťka vrstvy p	0,1	[mm]

Výpočet

Celková dráha paprsku l :

$$l = \frac{1000}{\phi} \cdot 1000 = 769230,8 \text{ mm} \quad (4)$$

Čas tisku čtverečního metru t :

$$t = \frac{l}{v} = \frac{769230,8}{25000} = 30,7 \text{ s/m}^2 \quad (5)$$

Pro výsledné porovnání byly rychlosti vztaženy na použitou tloušťku vrstvy, aby mohl být vyjádřen poměr časů, za které jsou obě metody schopny vytisknout myšlený objem. V případě použitého výpočtu měl myšlený objem rozměry 1000 x 1000 x 1 mm.

Výpočet:

Čas tisku myšleného objemu metodou 3DP:

$$t_{3DP} = \frac{t}{p} = \frac{22,2}{0,5} = 44,4 \text{ s} \quad (6)$$

Čas tisku myšleného objemu metodou SLS:

$$t_{SLS} = \frac{t}{p} = \frac{30,7}{0,1} = 307 \text{ s} \quad (7)$$

Poměr časů pro tisk myšleného objemu:

$$poměr = \frac{t_{SLS}}{t_{3DP}} = \frac{307}{44,4} = 6,9 \quad (8)$$

Z poměru časů tisku jednotlivých metod je zřejmé, že metoda 3DP je podstatně rychlejší. Objem, který by tato metoda vytiskla v řádu hodin, by metoda SLS tiskla v řádu dnů. Je nutné ovšem přihlédnout k tomu, že bylo zohledněno několik parametrů tisku a nebyl počítán čas tisku konkrétní formy, ale myšleného objemu.

6.2 Porovnání z hlediska pojivových systémů a vytvrzování

Metody SLS a 3DP jsou v pojivových systémech velmi odlišné. Jako jedinou podobnost lze uvést případ, kdy bylo u obou metod použito pojivo na bázi fenolu a křemičitý písek. Zde ovšem podobnosti končí. Nezbytnost povlakování písku pro následné slinutí laserem je značná nevýhoda. Pro slinování je navíc vhodné řídit se optimálním nastavením laseru pro správné slinutí materiálu, což nepříznivě ovlivňuje rychlost tisku. Navíc je nutný přehřev vrstvy, který má nepříznivý dopad na případnou recyklaci neslinutého materiálu. [2]

Metoda 3DP je v případě pojivových systémů mnohem rozmanitější. Využívá více typů pojivových systémů, které jsou vhodné pro většinu běžně používaných písků. Také nabízí možnost změny typu pojiva a písku po případném vyčištění celého zařízení. Další výhodou je možnost recyklace většiny nespojeného písku. Na rozdíl od SLS také může být v případě furanových pojiv vynechán proces vytvrzování pomocí tepelného působení. [16, 17]

Ovšem i metoda 3DP má svá úskalí. Pro správnou reakci pojiv je klíčová dostatečná teplota a snížená vlhkost vzduchu. To samé platí i pro případné skladování forem. Jak skladovací prostory, tak místnost s tiskárnou tedy musí mít vhodné vytápění a regulátor vzdušné vlhkosti. [5]

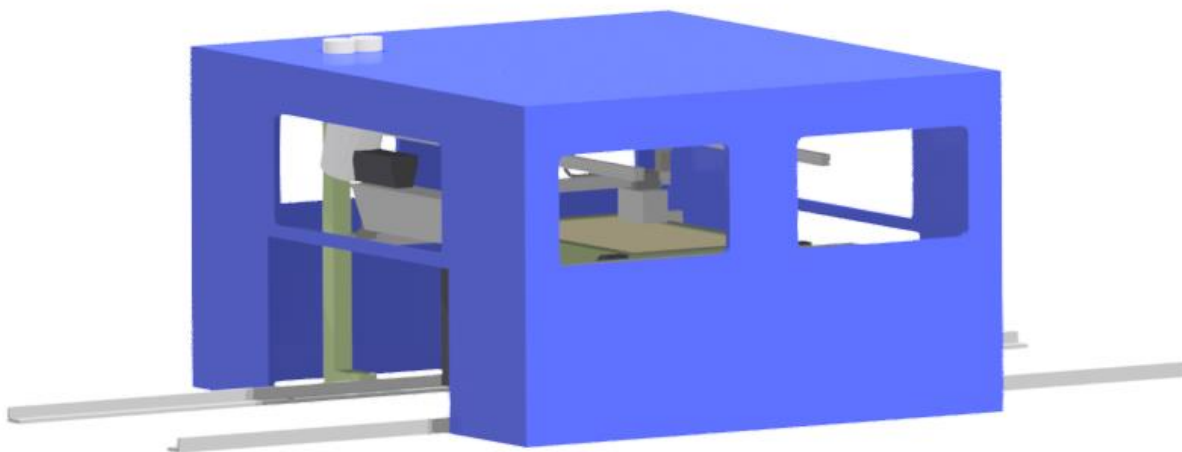
6.3 Volba vhodného konstrukčního uspořádání

S ohledem na rychlost tisku, složitost konstrukčního uspořádání a možnost použití různých pojivových systémů, se jeví 3DP tiskárna jako jednoznačně vhodnější. Již bylo zmíněno, že tisk je realizován pohybem tiskové hlavy, pohybem šnekového dopravníku a snižováním dna práškového lože. Z těchto pohybů je pohyb dna lože nejjednodušeji realizovaný a lze se inspirovat relativně jednoduchou konstrukcí lože, kterou využívají jak stroje ExOne, tak i Voxeljet.

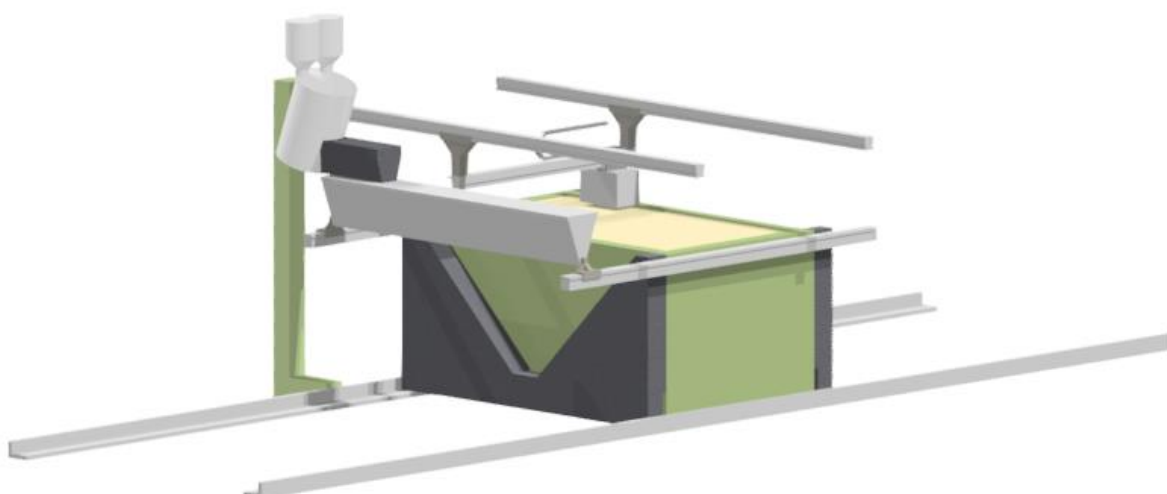
V případě pohybu tiskové hlavy a šnekového dopravníku vsadily obě firmy na realizaci pohybů na vedeních, která jsou rovnoběžná. Takové provedení dává možnost umístit vedení nad tiskovou plochu, kde je menší pravděpodobnost vniknutí částic a jejich zadírání do vedení. Jelikož jedním z klíčových parametrů tisku je čas tisku, stojí za zvážení úprava konstrukce, díky které by bylo možné zkrátit čas mezi nanášením vrstvy prášku a jejím spojováním. Ten je totiž omezen tím, že se šnekový dopravník musí po nanášení vrstvy vrátit do výchozí polohy, aby uvolnil prostor pro tiskovou hlavu a naopak. Při uspořádání obou vedení kolmo na sebe by byl možný „kyvadlový“ tisk, kdy by hned po nanášení nové vrstvy mohla hlava vyrazit z výchozí polohy bez čekání na uvolnění prostoru.

7 ZJEDNODUŠENÝ 3D MODEL STROJE PRO TISK SLÉVÁRENSKÝCH FOREM A JADER

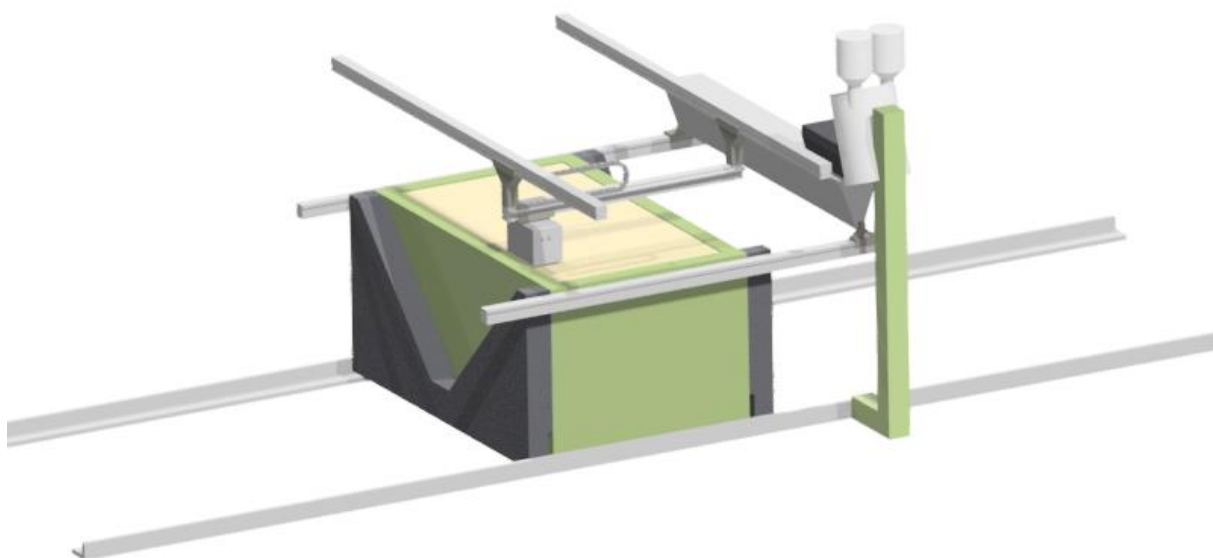
V minulé kapitole bylo zmíněno, že u zjednodušeného modelu bude kladen důraz na rychlost tisku, které má být dosaženo použitím kolmých vedení pro šnekový dopravník a tiskovou hlavu. Jelikož model není založen na vypočtených bezpečnostech pro jednotlivé části, jsou rozměry jednotlivých částí spíše orientační. Hlavními částmi modelu jsou vedení hlavy (obr. 21) a vedení šnekového dopravníku s mísičem (obr. 22). Další důležitou částí bylo pískové lože, jehož součástí byl prostor pro přebytečný písek, který dopravník „smetl“ po nanesení nové vrstvy. Pro lepší vizualizaci byla odebrána boční stěna tohoto prostoru. U modelu byly vynechány také pohony jednotlivých vedení, vysavač na odsávání nespojeného písku, hadice pro přívod písku a ovládací konzole, jelikož pro znázornění kinematického uspořádání nemají velkou vypovídající hodnotu.



Obr. 18) Zjednodušený model (zakrytovaný)



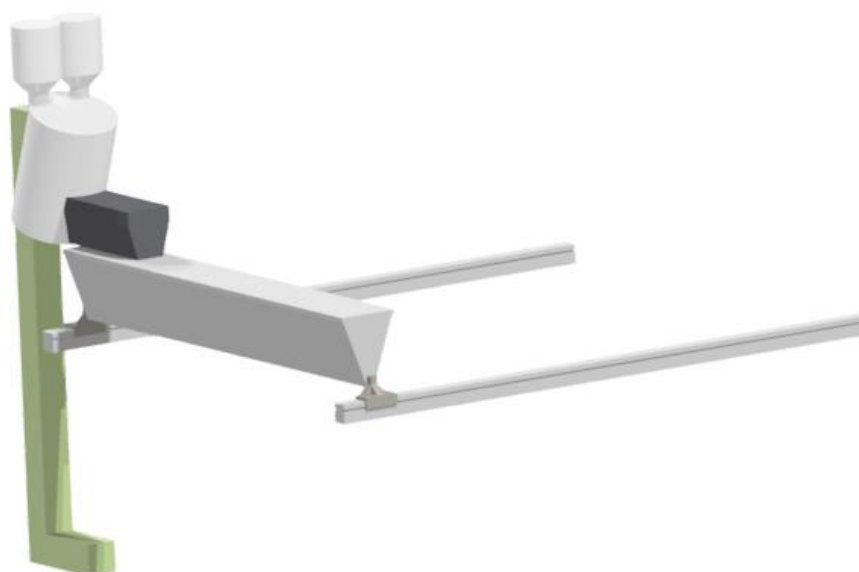
Obr. 19) Zjednodušený model (bez krytů a nosné konstrukce)



Obr. 20) Zjednodušený model (bez krytů a nosné konstrukce)



Obr. 21) Sestavení vedení tisk. hlavy



Obr. 22) Vedení šnek. dopravníku s mísičem

8 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Tisk pískových forem se poměrně rychle rozvíjí. Z toho důvodu nemusí být za rok tato práce aktuální. Například firma Voxeljet poměrně často zlepšuje a obměňuje své tiskové systémy, to může mít za následek, že výsledky této práce bude diskutabilní.

Také stojí za zmínku způsob, kterým byly porovnány rychlosti tisku technologií SLS a 3DP. U metody SLS výpočet sice vycházel z optimálních hodnot pro tisk, ovšem ve výpočtu bylo zohledněno mnoho parametrů. Zřetel nebyl brán na případný tvar jednotlivých průřezů a byly také zanedbány změny rychlosti laseru (pro celý výpočet byla použita konstantní hodnota). V úvahu je nutné vzít fakt, že výroba formy pomocí laseru je spíše experimentální (v průmyslu převládá 3DP) a poznatky vychází ze studie staré více než 20 let.

Při volbě vhodného konstrukčního uspořádání byl navržen model tiskárny, jehož předností má být vyšší rychlost tisku. U navrženého modelu ovšem nebyla určena rychlost tisku, jelikož nebyla součástí zadání práce. Použití kolmého uspořádání vedení s sebou ovšem přineslo řadu nevýhod. Jelikož tisková hlava je zavěšena na dvou vedeních, dala by se očekávat menší tuhost a tedy i přesnost tisku. Vedení šnekového dopravníku musí být pod úrovní tiskové plochy, aby nepřekážely v pohybu tiskové hlavy. To by v případě reálného stroje mělo za následek zvýšenou pravděpodobnost vnikání částic písku do vedení. Bylo by také nutné upravit šnekový dopravník, aby mohl nanést dvě vrstvy, než se opět spojí s mísičem. Dalším problémem je nutnost připevnění zásobníku na přebytečný písek k pracovnímu loži. Ten běžně bývá připevněn k nosné konstrukci, což se jeví jako jednodušší provedení. Pro dosažení rychlejšího tisku tímto způsobem by se tedy konstruktér musel zabývat řadou problémů. Z toho důvodu se toto konstrukční uspořádání jeví jako proveditelné, ovšem nepříliš vhodné.

9 ZÁVĚR

Do budoucna lze předpokládat, že nasazení 3D tisku v různých odvětvích průmyslu poroste. V moderním slévárenství má své místo již nyní. Dá se předpokládat zdokonalování v oblasti používaných materiálů a pojivových systémů. Již dnes jsou patrné snahy o to, aby byl proces co nejekologičtější a zdravý nezávadný. Prašné prostředí v okolí tiskáren a emise vzniklé při procesu by bylo vhodné do budoucna eliminovat.

S rozvojem aditivní výroby se také šíří dohady, zdali jednou nebudeme svědky tzv. továren na vše. Továren, kde lze vyrobit vše od špendlíku do osobního automobilu. V takovém případě by mohlo několik odvětví průmyslu zcela zaniknout. Ovšem je to velmi nepravděpodobné, jelikož řada konvenčních metod je nenahraditelná a mnohé metody mají lepší výsledné produkty, než aditivní výroba, navíc v kratším čase. I přesto lze s jistotou říct, že prolínání konvenčních výrobních metod a 3D tisk zlepší výrobu, slévárenství nevyjímaje.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. Praha: SNTL, 1990, 231 s. ISBN 80-03-00400-4.
- [2] KANG, Jin-wu a Qiang-xian MA, 2017. The role and impact of 3D printing technologies in casting. *China Foundry* [online]. 14(3), 157-168 [cit. 2018-05-22]. DOI: 10.1007/s41230-017-6109-z. ISSN1672-6421.
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s41230-017-6109-z>
- [3] Aditivní výroba a automatizace ve slévárenství. *Slévárenství*. 2017, **LXV** . 2017 . (3–4), 77-80. ISSN 0037-6825.
- [4] 3D tisk ve slévárenství v České a Slovenské republice. *Slévárenství*. 2017, **LXV** . 2017(3–4), 81-84. ISSN 0037-6825.
- [5] 3D tiskárny v praxi - využití moderní technologie ve slévárenství. *Slévárenství*. 2017, **LXV** . 2017(3 - 4), 85 - 88. ISSN 0037-6825.
- [6] Vstřelování jader versus 3D tisk jader. *Slévárenství*. 2017, **LXV** . 2017(3 - 4), 89 - 92. ISSN 0037-6825.
- [7] 3D tisk. Úzká spolupráce firem Voxeljet a Hüttenes-Albertus Group. *Slévárenství*. 2017, **LXV** . 2017(3 - 4), 98 - 101. ISSN 0037-6825.
- [8] DINI, Gino, et al. An Analytical Model of the Selective Laser Sintering of Pre-Coated Sands for Shell-Moulding. In: *Proceedings of the 5th Aitem Conference*. 2001.
Dostupné z:
https://www.researchgate.net/profile/Alessandro_Franco/publication/287215002_An_Analytical_Model_of_the_Selective_Laser_Sintering_of_Pre-Coated_Sands_for_Shell-Moulding/links/5674242908ae0ad265ba727c/An-Analytical-Model-of-the-Selective-Laser-Sintering-of-Pre-Coated-Sands-for-Shell-Moulding.pdf
- [9] ANTONELLI, Matt, Ian KNUDSON, Allison POPERNACK a Avalon SCHULER, 2016. Cast Aluminum Mesostructures Using 3D Printed Sand Cores with an Encapsulation. *International Journal of Metalcasting* [online]. 10(1), 111-113 [cit. 2018-05-22]. DOI: 10.1007/s40962-015-0011-5. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40962-015-0011-5>
- [10] PolyJet 3D printing. *Stratasys Direct Manufacturing* [online]. Los Angeles: Stratasysdirect, 2018 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/resources/videos/polyjet-how-it-works?resources=d04b14e2-e55e-4957-9157-a43a6e67bb11&phrase=polyjet>
- [11] S-Max Industrial Sand Casting 3D Printer by ExOne. *3dprinting* [online]. Amsterdam: 3dprinting, 2015 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/3dprinters/s-max-industrial-sand-casting-3d-printer-by-exone/>
- [12] NEW PLASTIC 3D PRINTING PROCESS FOR HIGHER QUALITY RESULTS IN INVESTMENT CASTING. *Voxeljet* [online]. Friedberg: Voxeljet, 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/company/news/new-plastic-3d-printing-process/>
- [13] History of ExOne. *ExOne* [online]. Gersthofen: ExOne, 2010 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.exone.com/About-ExOne/History>

- [14] THE VOXELJET COMPANY HISTORY. *Voxeljet* [online]. Friedberg: Voxeljet, 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/company/company-history/>
- [15] S-Max® Industrial Production 3D Printer. *ExOne* [online]. Gersthofen: ExOne, 2010 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Systems/Production-Printers/S-Max>
- [16] 3D PRINTING SYSTEMS: MATERIALS AND ADVANTAGES. *Voxeljet* [online]. Friedberg: Voxeljet, 2011 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/>
- [17] 3D Printing Binders. *ExOne* [online]. Gersthofen: ExOne, 2016 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Resources/Binders>
- [18] SAND CASTING MOLDS - RAPID AND ECONOMICAL. *Voxeljet* [online]. Friedberg: Voxeljet, 2014 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/materials/sand/>
- [19] Industry Grade Materials. *ExOne* [online]. Gersthofen: ExOne, 2014 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Resources/Materials>
- [20] SAND CASTING. *FV-CAST* [online]. Dubaj: FV-CAST [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.fv-cast.com/en/production/>
- [21] Investigating Effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 using Designed Experiment. *Materials* [online]. Stavanger, Norsko: Katedra strojního a konstrukčního inženýrství a materiálové vědy, Stavangerská univerzita, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/4/500/xml>
- [22] Proteomics & Bioinformatics: 3D Printing for Foot. *MedCrave* [online]. Indie: Katedra biotechnologie, Bapuji Institut inženýrství a technologie, 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://medcraveonline.com/MOJPB/MOJPB-05-00176.php>
- [23] Polyjet Technology. *SMP Tech* [online]. Kalifornie: SMP Tech [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.smptech.com/service_Polyjet_mfg.htm
- [24] Process DMLS. *SMP Tech* [online]. California: SMP Tech, 2008 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.smptech.com/service_DMLS_mfg.htm
- [25] Investment Casting. *Aristo Cast - Investment Casting* [online]. Almont, Michigan: Aristo Cast Corporation, c2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.aristo-cast.com/investment-casting.html>
- [26] TOPČIĆ, A., CERJAKOVIĆ, E., LOVRIĆ, S. ANALYSIS OF DIMENSIONAL DEVIATION OF PARTS BASED ON CERAMIC PRODUCED BY THREE DIMENSIONAL PRINTING PROCESS. *Journal of Production Engineering* [online]. 2014, **17**(1) [cit. 2018-05-21]. DOI: 1821-4932. 17. 63-66. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275333333_ANALYSIS_OF_DIMENSIONAL_DEVIATION_OF_PARTS_BASED_ON_CERAMIC_PRODUCED_BY_THREE_DIMENSIONAL_PRINTING_PROCESS?_sg=2ltrLgleenLJIP5jLpkJvM1I2J8umuLNGTiWSO-0iGighsYhGbsf34CJbXqKcumTaqfZ9joUCx0LaGe_W914iF4LxLp3a6dt-Q
- [27] Optimizing Lattice. *SolidThinking Inspire* [online]. solidThinking: solidThinking, c2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://solidthinking.com/help/Inspire/2017.3/win/en_us/index.html?optimizing_lattice.htm

- [28] WHAT FOUNDRIES HAVE TO KNOW ABOUT 3D-PRINTING. *Voxeljet* [online]. Friedberg, Německo: Voxeljet [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/company/news/what-foundries-have-to-know-about-3d-printing/>
- [29] ExOne GmbH. *European business* [online]. Mnichov (Německo): Evropský podnik, c2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.european-business.com/exone-gmbh/portrait/>
- [30] VX4000 - THE WORLD'S BIGGEST INDUSTRIAL 3D PRINTER. *Voxeljet* [online]. Friedberg, Německo: Voxeljet, 2016 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/vx4000/>
- [31] High-Tech Solutions for Laser Marking, Coding and Engraving. *ALLTEC Laser Business Unit* [online]. ALLTEC, 2012 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.alltec-laser.com/lbu/LBU/Our-Solutions/Technologies>
- [32] CX - žlabové šnekové dopravníky. *Has* [online]. Villa Motta , Itálie: WAMGROUP, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.has.cz/produkty/snekove-dopravniky-elevatory-retezove-dopravniky/cx-zlabove-snekove-dopravniky-z-nerezove-oceli>

11 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

11.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Tabulka vstupních parametrů výpočtu (3DP)	35
Tab 2)	Tabulka vstupních parametrů výpočtu (SLS)	36

11.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Schéma technologie odlévání podle trvalého modelu	17
Obr. 2)	Schéma metody fdm	18
Obr. 3)	Schéma metod sla a polyjet	19
Obr. 4)	Schéma metody dmls	19
Obr. 5)	Schéma technologie vytavitelného modelu	20
Obr. 6)	Schéma metody 3dp	21
Obr. 7)	Písková forma vytvořená tiskárnou S-MAX (ExOne)	22
Obr. 8)	Shrnutí aplikací 3D tisku v různých slévárenských odvětvích	23
Obr. 9)	Optimalizace dílu pomocí vygenerované mřížky	25
Obr. 10)	Tištěné jádro pro Francisovu turbínu (Voxeljet)	26
Obr. 11)	Tiskárna exone s-max	27
Obr. 12)	Tiskárna voxeljet vx4000	27
Obr. 13)	Mechanika nasměrování paprsku laseru	29
Obr. 14)	Tisková hlava (exone s-max)	30
Obr. 15)	Šnekový dopravník	30
Obr. 16)	Odlitek pro test min. tloušťky stěny	32
Obr. 17)	Schéma struktury při vytvrzování	33
Obr. 18)	Zjednodušený model (zakrytovaný)	32
Obr. 19)	Zjednodušený model (bez krytů a nosné konstrukce)	33
Obr. 20)	Zjednodušený model (bez krytů a nosné konstrukce)	32
Obr. 21)	Sestavení vedení tisk. hlavy	33
Obr. 22)	Vedení šnek. dopravníku s mísičem	32

12 SEZNAM PŘÍLOH

CD