

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



Disertační práce

Název práce:

Rapid prototyping – využití technologie sandprint

| | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Autor: | Ing. Libor HORÁČEK |
| Doktorský studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie |
| Školitel: | doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc. |
| Školitel specialista: | Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE |

Praha 2022



Anotace:

| | |
|-------------------------|--|
| Vysoká škola: | ČVUT v Praze, Fakulta strojní |
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Vedoucí ústavu: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, PhD., IWE |
| Název disertační práce: | Rapid prototyping – využití technologie sandprint |
| Akademický rok: | 2021/2022 |
| Autor: | Ing. Libor HORÁČEK |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc. |
| Klíčová slova: | Rapid prototyping, 3D tisk, sandprint, slévárenství, lící forma, přípravky, pryskyřice |

Rozsah práce a příloh:

| | |
|----------------|-----|
| Počet stran: | 163 |
| Počet obrázků: | 140 |
| Počet tabulek: | 30 |



Annotation:

| | |
|-------------------------|--|
| University: | CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering |
| Department: | Department of Manufacturing technology |
| Head of the department: | doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE |
| Theme of work: | Rapid prototyping – use of technology sandprint |
| Academic year: | 2021/2022 |
| Autor: | Ing. Libor HORÁČEK |
| Supervisor: | doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc. |
| Keywords: | Rapid prototyping, 3D print, sandprint, casting, cast tool, patterns, resins |

Volume of work:

| | |
|---------------------|-----|
| Number of pages: | 163 |
| Number of pictures: | 140 |
| Number of tables: | 30 |

Abstrakt:

Disertační práce se zabývá výzkumem aditivní technologie Sandprint, neboli 3D tisku z písku na principu Binder jetting, která se jeví jako nejvhodnější způsob aplikace pro výrobu forem ve slévárenství, ale i pro další využití ve strojírenství.

Ze všech zatím známých způsobů aditivní výroby byla vybrána tato technologie, přestože je zatím nejméně rozšířená. Je však vhodná pro zásadní a nezbytné změny v technologiích slévání v rámci probíhajících změn v digitalizaci výroby v období nazývaném Průmysl 4.0.

Práce se zabývá vývojem v etapě předvýrobního výzkumu a vývoje digitální aditivní technologie Rapid prototyping s cílem praktického využití v těchto směrech:

1) Tisk slévárenských forem pro tvarově složité kovové odlitky

Na základě provedených experimentů jsou popsány problematické oblasti i detaily při použití této technologie při výrobě forem. Navrženy jsou testovací formy na základě odladění tvarově problémových partií odlitků.

2) Tisk technologických a kontrolních přípravků

Při těchto nových aplikacích je využito vlastností tištěných struktur, jejich tvarově neomezených možností, teplotní odolnosti použitých materiálů a v neposlední řadě rychlost a nízká cena výroby.

3) Vývoj nového materiálu – pískového kompozitu

Jde o pryskyřicemi zpevněný a dále vhodně vyztužený materiál, který vykazuje nové potřebné vlastnosti. Může být využit pro výrobu nejen slévárenských forem, ale i pro řadu různých přípravků a funkčních strojních součástí.

Práce je zaměřena na možnosti digitalizace ve strojírenských technologiích a digitalizaci vazeb konstrukční a technologické části výroby.

Abstract:

This dissertation deals with the research of the additive technology Sandprint on the principle of Binder jetting, which seems to be the most suitable way to apply 3D printing from sand to produce molds in foundry also for further use in mechanical engineering. From all known additive production methods, this technology was chosen, which is the least widespread so far. However, it is suitable for fundamental and necessary changes in casting technologies as part of the ongoing changes in the digitization of production in the period called Industry 4.0.

The work deals with the development in the stage of pre-production research and development of this digital additive technology Rapid prototyping with the aim of practical use in the following directions:

- 1) Printing of foundry molds for complex metal castings. Based on the performed experiments, problematic areas and details in using this technology in the production of molds are described. Test molds are designed based on debugging shape problem parts of castings.
- 2) Printing of welding, gluing, and measuring jigs. In these new applications, the properties of printed structures, their unlimited possibilities, the temperature resistance of the materials used, and last but not least, the speed and low cost of production are used.
- 3) Development of a new material - sand composite, a resin-reinforced and suitably reinforced material that exhibits new and necessary properties. It can be used for the production of foundry molds and a number of different jigs and functional machine parts. The work is focused on the possibilities of digitization in the production of engineering technological realizations of interconnections and connections of the structural and technological part of the production



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci na téma „Rapid prototyping prototyping – využití technologie sandprint“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Viktora KREIBICHA, CSc. a Ing. Jiřího KUČAŘE, Ph.D., IWE.

V seznamu literatury jsem uvedl všechny použité literární odborné zdroje.

V Liberci dne 11. 1. 2022

vlastnoruční podpis autora



Poděkování:

Děkuji Fakultě strojní ČVUT v Praze za možnost studia, kterého se mi tímto dostalo a všem pracovníkům, od kterých jsem měl možnost čerpat nové vědomosti.

Děkuji tímto svým školitelům doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. a Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE.

Děkuji mému zaměstnavateli – firmě Modelárna-Liaz spol. s r.o. v Liberci, a především jejímu majiteli doc. Ing. Vojtěchu Pražmovi, který mi umožnil experimenty s využitím finančně nákladné investice – tiskárny S-max, jakožto i slévárny a tímto byl vytvořen prostor nejen pro mé studium, ale především pro zavedení této progresivní technologie do českého strojírenství.

Děkuji též všem spolupracovníkům naší firmy za veškerou technickou spolupráci při experimentech.

Poděkování patří bezesporu i kolegům a přátelům z výzkumných pracovišť strojírenské praxe, především ve VÚTS Liberec, kteří mi umožnili provedení některých vybraných zkoušek.

Děkuji v neposlední řadě své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia i sepsání této práce.

Seznam použitých zkratk a symbolů:

| | | |
|---------------------|---------------------------------------|--|
| 3D | three - dimensional | trojrozměrný |
| Aktivátor | | chemikálie sloužící jako tužidlo bázi kyseliny arylsulfonové a kyseliny sírové |
| Axson technologies | | výrobce pryskyřice Epolam 5015 |
| B1 až B5,MT | | značení slévárenských chladítek |
| bigbag | | transportní pytel na písek o objemu 1m ³ |
| binder | | pryskyřice sloužící k pojení jednotlivých vrstev tisku |
| CAD | Computer aided design | systém pro počítačem podporované projektování |
| Cleaner | | čistič systému trysek tiskárny na bázi alkoholu |
| CNC | Computer Numeric Control | číslicové řízení počítačem, nejčastěji u obráběcích strojů |
| ČSN | | československá státní norma |
| D(10) | | 10% částic je pod udávanou hodnotu |
| D(3/4) | | střední velikost částic odpovídající síťové analýze |
| D(50) | | střední velikost částic |
| D(90) | | 90% částic je pod udávanou hodnotu |
| DED | Directed energy deposition | systém 3D tisku z prášku nebo drátu spěkaného laserem, plazmatem nebo el. obloukem |
| Epolam 5015 | | označení napouštěcí pryskyřice |
| ExOne | | výrobce tiskáren S-Max, Německo |
| FDM | fused deposition modeling | systém 3D tisku |
| FLIR E8 | | označení termokamery |
| FS001 | fulan sand | písek pro tisk o zrnitosti 0,14mm pro furanovou pryskyřici |
| FS003 | fulan sand | písek pro tisk o zrnitosti 0,19mm pro furanovou pryskyřici |
| FS051 | fenol sand | písek pro tisk o zrnitosti 0,15mm pro fenolovou pryskyřici |
| furanová pryskyřice | | pryskyřice na bázi furfurylalkoholu |
| GRM Systems | | výrobce pryskyřice LG 735 Aero |
| hm. d. | | hmotnostní díly |
| CHS Epodur 498-1667 | | označení napouštěcí pryskyřice |
| ICP-OES | | optická emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem |
| Instron 3369 | | zkušební přístroj na zkoušky tahem, tlakem a ohybem |
| Jatagan EU | | výrobce pryskyřice CHS Epodur 498-1667 |
| Jatapol WR90 | | označení napouštěcí pryskyřice |
| know-how | | popisuje technologické a informační předpoklady a znalosti pro určitou činnost |
| KOKP | | kritická objemová koncentrace plniva |
| LD | | laserová difrakce |
| LG 735 Aero | | označení napouštěcí pryskyřice |
| Liaz | | Liberecké Aerozávody |
| MD | | mez detekce |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology | Massachusettský technologický institut |
| ML | Modelárna-Liaz | majitel a provozovatel tiskárny S-max |
| MZ | | modelové zařízení |
| OM | | optická mikroskopie |
| Průmysl 4.0 | | označení pro digitalizaci a automatizaci výroby |

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| PTSA | | kyselina p-toluensulfonová |
| PUR | polyurethane | polyuretan |
| RXD | | rentgenová difrakční analýza |
| RXF | | rentgenová spektrální (fluorescenční) analýza |
| S -T | | Sand Team spol. s r.o. |
| SI | Le Système International d'Unités | Mezinárodní systém jednotek |
| Sieb analýza | | sítová analýza - granulometrický rozbor složení písku |
| SLS | selective laser sintering | systém 3D tisku z prášku spěkaného laserem |
| S-Max | | tiskárna pro 3D tisk z písku |
| Spolchemie | | výrobce pryskyřice CHS Epodur 498-1667 |
| SS151 | SkySpotter 151 | označení bezpilotního vrtulníku LIAZ |
| STL | stereolithography | formát 3D dat pro 3D tisk |
| TPV | | technická příprava výroby |
| VÚAnCh | | Výzkumný ústav anorganické chemie |
| WAAM | Wire Arc Additive Manufacturing | aditivní výroba navařováním el. obloukem |
| GP | | normální jednotka prodyšnosti |
| K | | Kelvin |
| Kč | | korun českých |
| kg/l | | kilogram/litr |
| kg/m ³ | | jednotka měrné hmotnosti |
| kN | | kilonewton |
| ks | | kus |
| l | | litr |
| L _o | | délka v počátečním stavu |
| mm | | milimetr |
| MPa | | megapascal |
| T _o | | teplota na počátku měření |
| T ₁ | | teplota na konci měření |
| α | | koeficient teplotní roztažnosti] |
| ΔL ₁ | | přírůstek délky na konci měření |
| Al ₂ O ₃ | | oxid hlinitý |
| AlSi10Mg | | označení hliníkové slitiny s 10 % Si |
| CaO | | oxid vápenatý |
| Fe ₂ O ₃ | | oxid železitý |
| K ₂ O | | oxid draselný |
| MgO | | oxid hořečnatý |
| Na ₂ O | | oxid sodný |
| P ₂ O ₅ | | oxid fosforečný |
| SiO ₂ | | oxid křemičitý |
| TiO ₂ | | oxid titaničitý |

Obsah:

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod | 12 |
| 2 | Rešerše současného stavu 3D tisku | 14 |
| 2.1 | Popis jednotlivých principů 3D tisku a jejich charakteristika | 17 |
| 2.1.1 | Stereolithography – SLA | 17 |
| 2.1.2 | Selective Laser Sintering – SLS | 18 |
| 2.1.3 | Fused Deposition Modeling – FDM | 20 |
| 2.1.4 | Multi Jet Fusion – MJF | 21 |
| 2.1.5 | Material jetting | 22 |
| 2.1.6 | Electron Beam Melting – EBM | 23 |
| 2.1.7 | Sheet lamination | 24 |
| 2.2 | Situace ve slévárenství a 3D tisku písku v průmyslu | 25 |
| 2.3 | Tiskárna S-Max od firmy ExOne | 30 |
| 2.3.1 | Princip sandprintu na 3D tiskárně | 31 |
| 2.3.2 | Technické parametry použitého zařízení – 3D tiskárny S-Max | 36 |
| 2.4 | Problematika použití technologie sandprint ve slévárenství | 38 |
| 2.4.1 | Ekonomické aspekty | 39 |
| 2.4.2 | Práce s 3D daty | 45 |
| 2.4.3 | Vtoková soustava a odvětrání formy | 48 |
| 2.4.4 | Odlévání detailů (drážek, děr, žeber) | 53 |
| 2.4.5 | Simulace licího procesu | 55 |
| 2.4.6 | Konstrukce a rozměry formy | 58 |
| 3 | Cíle práce | 66 |
| 4 | Návrh experimentů | 67 |
| 4.1 | Odlévání složitých tvarů | 67 |
| 4.1.1 | Lití žeber | 69 |
| 4.1.2 | Lití drážek | 70 |
| 4.1.3 | Lití výstupků | 70 |
| 4.1.4 | Lití otvorů | 71 |
| 4.1.5 | Polohy lití vzorků | 71 |
| 4.2 | Možnosti úprav tištěné struktury pro zlepšení mechanických vlastností | 73 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5 | Praktická část – provedené experimenty | 78 |
| 5.1 | Odlévání složitých tvarů | 78 |
| 5.1.1 | Vytištění forem | 78 |
| 5.1.2 | Čištění forem po tisku | 79 |
| 5.1.3 | Lití vzorků | 80 |
| 5.1.4 | Výsledky lití | 82 |
| 5.2 | Možnosti úprav tištěné pískové struktury pro docílení jiných mechanických vlastností | 89 |
| 5.2.1 | Analýzy spotřebních materiálů | 89 |
| 5.2.2 | Zkoušky pískové tištěné struktury | 96 |
| 5.2.3 | Shrnutí výsledků provedených zkoušek tištěných pískových struktur z písku | 126 |
| 5.3 | Využití upravené tištěné struktury pro výrobu funkčních dílů a přípravků | 127 |
| 5.3.1 | Přípravky na svařování | 128 |
| 5.3.2 | Přípravky pro měření | 129 |
| 5.3.3 | Přípravky na dochlazování | 131 |
| 5.3.4 | Přípravky na laminování | 132 |
| 5.3.5 | Přípravky pro slévárenství | 133 |
| 5.3.6 | Zástavbové modely, funkční a pomocné makety | 134 |
| 6 | Diskuse výsledků | 135 |
| 7 | Závěr a splnění cílů | 138 |
| 8 | Seznam použité literatury | 142 |
| 9 | Normy | 148 |
| 10 | Publikační činnost autora | 150 |
| 11 | Vyzvané přednášky | 152 |
| 12 | V a V činnost autora | 153 |
| 13 | Seznam obrázků | 156 |
| 14 | Seznam tabulek | 161 |
| 15 | Seznam příloh | 163 |

1 Úvod

Technologie Rapid prototyping jsou obecně a původně soubory technologií, které umožňují rychlou výrobu prototypových výrobků nebo jejich součástí. Tyto výrobky mohou být vytvořeny v různém provedení, a to od pohledových či designových maket až po zcela funkční odladěné výrobky s kvalitou a s vlastnostmi sériových výrobků.

Technologie Rapid Prototyping procházejí značným technickým rozvojem především na základě vývoje výpočetní techniky. Výroba trojrozměrných předmětů je dnes možná díky řadě technologií a principů obvykle vyvinutých pro určitý materiál. Podle použitého principu, materiálu a zařízení pro tisk se liší charakteristika a vlastnosti vytištěného výrobku. Pro potřeby aplikace tohoto principu ve výrobě se hledají nové možnosti této aditivní výroby, a to i z dalších materiálů.

Jednou z těchto technologií je i 3D tisk. Touto technologií lze velmi efektivně vyrábět tvarově a materiálově komplikované součásti, které by byly konvenčními způsoby nevyrobitelné. Lze takto vyrábět i ze zcela nových vícesložkových materiálů tvořených z digitálně dávkovaných jednotlivých složek.

Volbu technologie 3D tisku je potřebné vždy rozhodnout podle požadavků na výrobek a potřeb výroby především z těchto hledisek:

- funkce
- použití
- cena
- rychlost výroby
- post processing, což jsou dodatečné úpravy vytištěného dílu
- kvalita povrchu
- životnost
- materiál



Vývoj oboru aditivních technologií probíhá již více než 40 let. Zapatentovat 3D tisk si nechal v roce 1986 Chuck Hull, a to konkrétně technologii stereolitografie. Teprve v posledních 20 letech došlo vzhledem k dostupnosti a vývoji výpočetní techniky k plnému rozvoji a v posledním období i ke komercializaci těchto technologií.

V novém období, zvaném „Průmysl 4.0“ má 3D tisk velmi významnou roli. Díky němu je možné tvořit z trojrozměrných CAD dat přímo výrobky, jejich díly, nebo formy. Dále je možné jejich výrobu digitalizovat, automatizovat, efektivně řídit, kontrolovat a plánovat. Na základě zpětné vazby lze také snadněji optimalizovat výrobní procesy. Za pomoci 3D tisku lze digitalizovat i takové obory jako je slévárství, které bylo vždy ve velké míře závislé na ruční práci.

K perspektivním novým materiálům pro aplikace ve strojírenství se řadí i materiály na bázi písku. Tento anorganický nekovový materiál má řadu důležitých i nezastupitelných fyzikálních vlastností potřebných při aplikacích 3D tisku v řadě strojírenských technologií.

Každý nový způsob výroby nezbytně vyžaduje etapu předvýrobního výzkumu a vývoje. Cílem je zajištění optimálních parametrů, odstranění chyb a odladění technologií před zavedením do výrobních aplikací. O to více je tato etapa nutná, ale při přechodu na digitální způsob výroby. V technologických oborech se do budoucna uvažuje i o změně celého způsobu výroby navzdory své náročnosti. Budou se tak prodávat a vyvážet 3D data. Výrobní firmy s digitálními technologiemi budou vyrábět nejen tiskem, ale i třeba CNC obráběním apod.

Digitální technologie hrají velkou roli v oboru zvaném Reversní inženýrství, kdy jsou z již hotových fyzických dílů zpětně tvořena 3D data pro další použití s možností elektronického archivování a modifikace.

2 Rešerše současného stavu 3D tisku

Aditivní technologie – 3D tisk byla ještě před 15 lety spíše laboratorní a prototypovou záležitostí. Dnes postupně proniká do mnoha oborů, a to jak do kusové, tak i sériové výroby. V současné době je 3D tisk na takové úrovni, že je možné tisknout z široké škály anorganických i organických materiálů. Stavebním materiálem tisku může být vosk, plasty, kovy, stavební hmoty a živočišné či rostlinné buňky. Velikost vytištěných objektů se může pohybovat od zlomků mm až po desítky metrů [20, 22].

Postupně bylo vyvinuto 7 základních typů 3D tisku:

- 1) Stereolithography - SLA
- 2) Selective Laser Sintering - SLS
- 3) Fused Deposition Modeling - FDM
- 4) Multi Jet Fusion - MJF
- 5) Material jetting
- 6) Electron Beam Melting – EBM
- 7) Sheet lamination

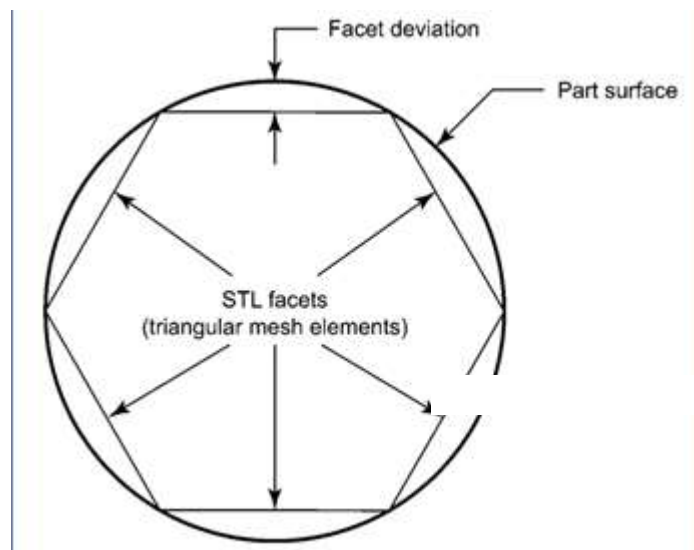
Všechny typy 3D tisku mají společný princip, který lze popsat v následujících bodech:

- 1) Vytvoření 3D dat v příslušném formátu

Pro 3D tisk byl vytvořen speciální formát 3D dat zvaný STL (zkratka slova stereolitography). Tento formát byl vytvořen firmou 3D Systems právě pro technologii 3D tisku. STL soubor popisuje triangulovaný povrch pomocí jednotkových normálových vektorů a vrcholů, bez prezentace barev, textur a podobných charakteristik používaných v oblasti CAD modelování. Občas jsou používány i další názvy pro zkratku STL a to např. „Standard Triangle Language“ a „Standard Tessellation Language“. Tato data musí mít uzavřený povrch, jinak je 3D tiskárna není schopna zpracovat [10].

Data v tomto formátu mohou vzniknout následujícími způsoby:

- a) Překladem z konstruktérsky vymodelovaného CAD modelu. Většina CAD programů má nástroj – překladač do více formátů včetně STL.
- b) Oskenováním fyzického objektu pomocí 3D scanneru, kdy výstupem jsou přímo 3D data ve formátu STL. Tento postup je aplikován například v disciplíně zvané „Reversní inženýrství“, kdy jsou CAD data tvořena dodatečně k již hotovým výrobkům, vzniklých jinou technologií.
- c) Tvorba dat pomocí „fotogrammetrie“, což představuje nafocení série kvalitních fotografií fyzického objektu a jejich následné zpracování pomocí speciálních softwarů – výsledkem je podobně jako u scannování 3D model ve formátu STL.

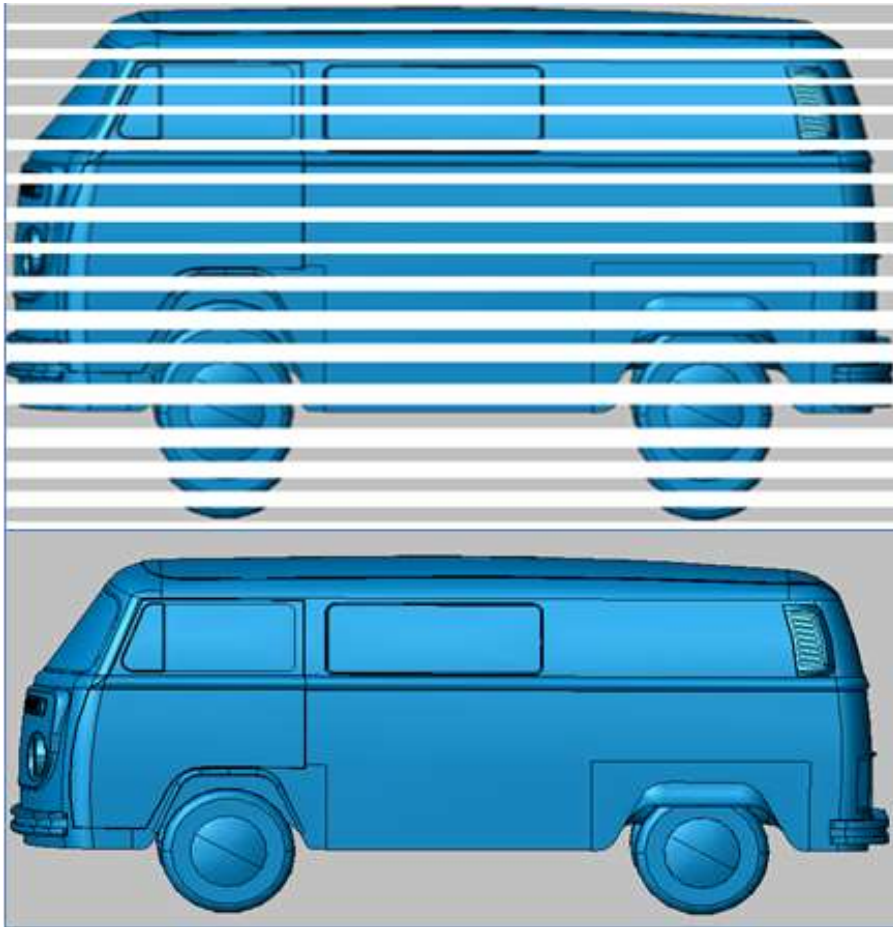


Obrázek 1: 3D model kruhu – porovnání CAD a STL dat [10]

Na obrázku 1 je porovnání dvou modelů v různých formátech, kdy je na CAD modelu vidět, že povrch dílu – mezikruží je hladký a v případě STL modelu je tvořen trojúhelníky.



- 2) Umístění datových modelů do pracovního prostoru tiskárny. Modely se musí naskládat tak, aby nebyly v dotyku nebo v kolizi. Ve většině případů se modely umísťují tak, aby co nejlépe vyplnily půdorys pracovního prostoru. Nemusí být vyplněn pracovní prostor ve svislém směru – ose „z“. V tom případě se následně tiskne jen do výšky nejvyššího bodu umístěných datových modelů. Mohou nastat případy, kdy se modely umísťují v určité poloze vztahované k rovině pokládání tištěných vrstev. Výrobky z 3D tiskáren totiž většinou nemají shodné mechanické i vzhledové vlastnosti ve všech souřadných osách.
- 3) Softwarové zpracování 3D dat v 3D tiskárně. Po nahrání 3D dat do tiskárny se z nich vytvořený 3D objekt horizontálně rozdělí - „rozřeže“ na vrstvy, čímž vzniknou ploché dvojrozměrné obrazce. Obrázek 2 znázorňuje, že tloušťka vrstvy je dána typem tisku, schopností 3D tiskárny a materiálem, z kterého se tiskne.
- 4) Samotný tisk. Ten spočívá v podstatě v tištění jednotlivých plochých obrazců z určitého materiálu a vrstvení těchto obrazců na sebe. Tím vzniká fyzický trojrozměrný model. Při tomto procesu si některé typy tiskáren vytvářejí podpory umožňující tisknout i do prostoru, kde předchozí vrstva není.
- 5) Post processing – dodatečná úprava vytištěného trojrozměrného objektu. Jedná se o odstranění podpor mechanicky nebo chemicky, odstranění vnitřního pnutí, vyhlazení povrchu, kalibrace děr a závitů, lakování a podobně.
- 6) Výstupní kontrola vytištěného objektu – kontrola rozměrů, mechanických vlastností, porozity, homogenity, prodyšnosti. Kontrola se volí podle technologie tisku a charakteru použití tištěného dílu.



Obrázek 2: Schéma datového dělení objektu pro tisk

2.1 Popis jednotlivých principů 3D tisku a jejich charakteristika

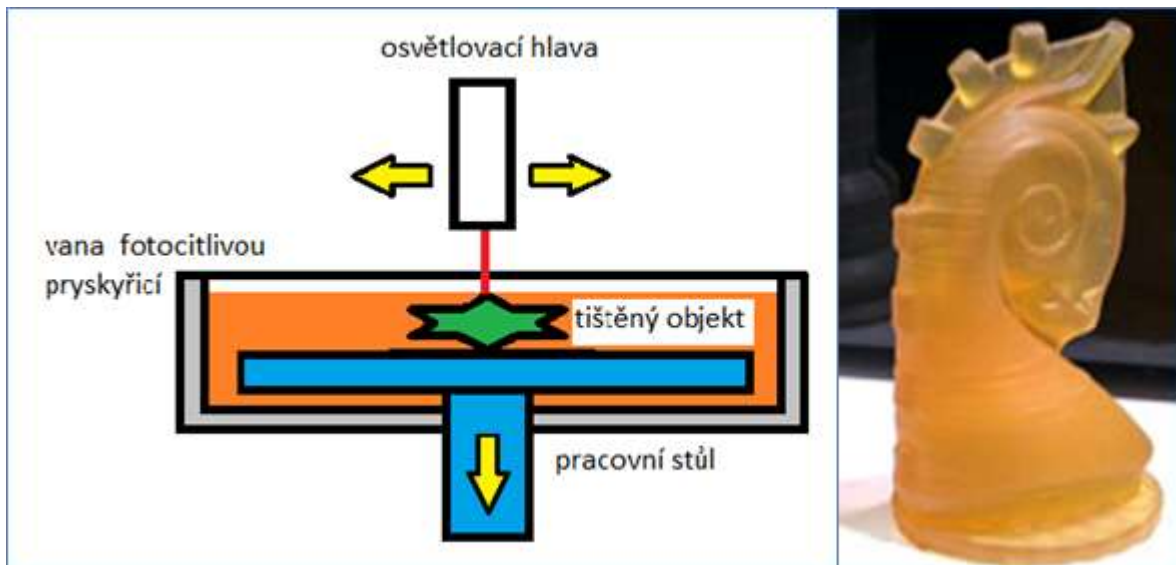
Zde jsou představeny základní principy doposud vyvinutých metod 3D tisku. Každá z metod má svoje typické vlastnosti, výhody a nevýhody. Vhodným využitím výhod vytištěných dílů různými principy lze dosáhnout vysoké efektivity jejich použití. Bohužel terminologie v tomto relativně mladém oboru není ještě ustálená, a tak se mohou určité typy 3D tisku objevovat pod různými názvy a jejich zkratkami [4, 22].

2.1.1 Stereolithography – SLA

Tento princip se také objevuje pod názvem VAT photopolymerization nebo DLP Digital Light Process.

Stavebním materiálem je fotopolymerní kapalina – fotocitlivá pryskyřice, která mění své vlastnosti působením řízeného světla. Na pracovním stole se vždy ozáří tenká vrstva fotopolymerní kapaliny a v ozářeném místě dojde k jejímu vytvrzení. Pracovní stůl po vytvrzení kapaliny sjede o tloušťku vrstvy dolů a následuje další ozáření.

Takto se po vrstvách postupně vytvoří celý vytištěný trojrozměrný objekt. Nevytvrzená kapalina se po přefiltrování použije pro další tisk. [4]



Obrázek 3: Princip metody Stereolithography a ukázka vytištěného objektu

Výhody:

- Přesnost
- precizní detail
- možnost průhledného materiálu
- možnost recyklace fotopolymerní kapaliny

Nevýhody:

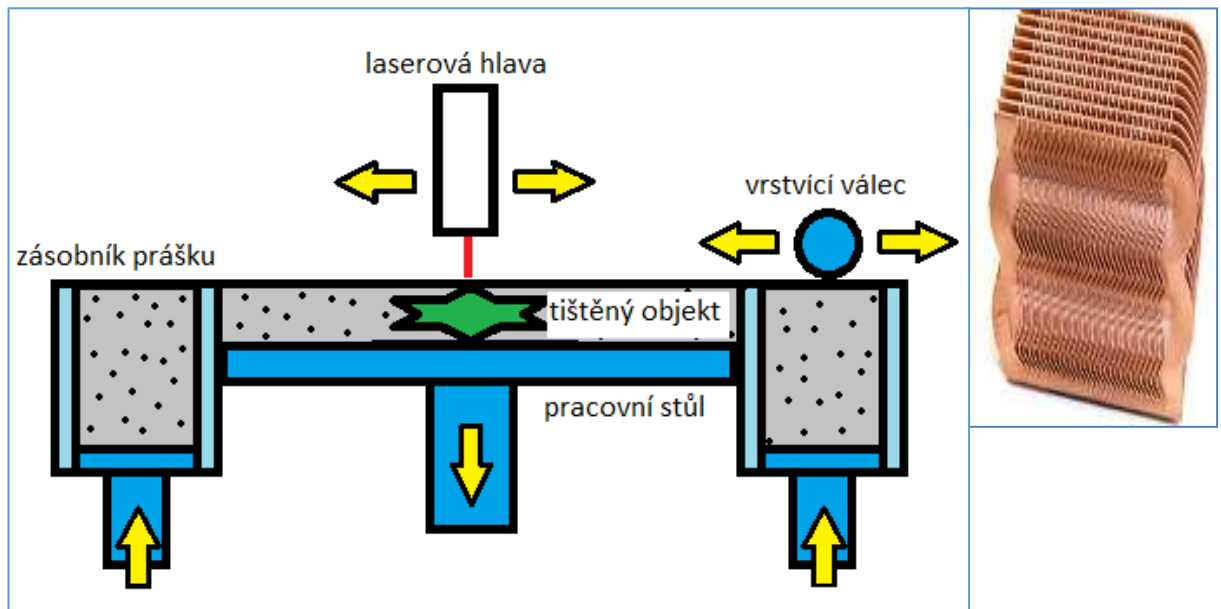
- malá rychlost
- nestabilita tištěných dílů
- nízká odolnost vůči UV záření
- malý sortiment materiálů
- nižší pevnost

2.1.2 Selective Laser Sintering – SLS

Tento princip se také objevuje pod názvem Selective Laser Melting – SLM nebo pro tisk pouze kovů Direct Metal Laser Sintering – DMLS

Stavební materiál je ve formě prášku, který je tavitelný a je schopen se při tavení spojovat v celistvou hmotu.

Materiál je postupně vrstven do pracovního prostoru a každá vrstva je spékána řízeným paprskem laseru nebo infračerveného záření. Stavebním materiálem mohou být vosky, plasty, kovy, písek, sklo a jejich směsi. Nespojený materiál slouží jako podpora pro další vrstvy. [4]



Obrázek 4: Princip metody Selective Laser Sintering a ukázka vytištěného objektu

Výhody:

- možnost tvorby digitálních materiálů
- možnost míchat různé materiály – tvorba digitálního materiálu
- dokonalé detaily
- nízká hodnota drsnosti povrchu až $Ra1,6 \mu m$

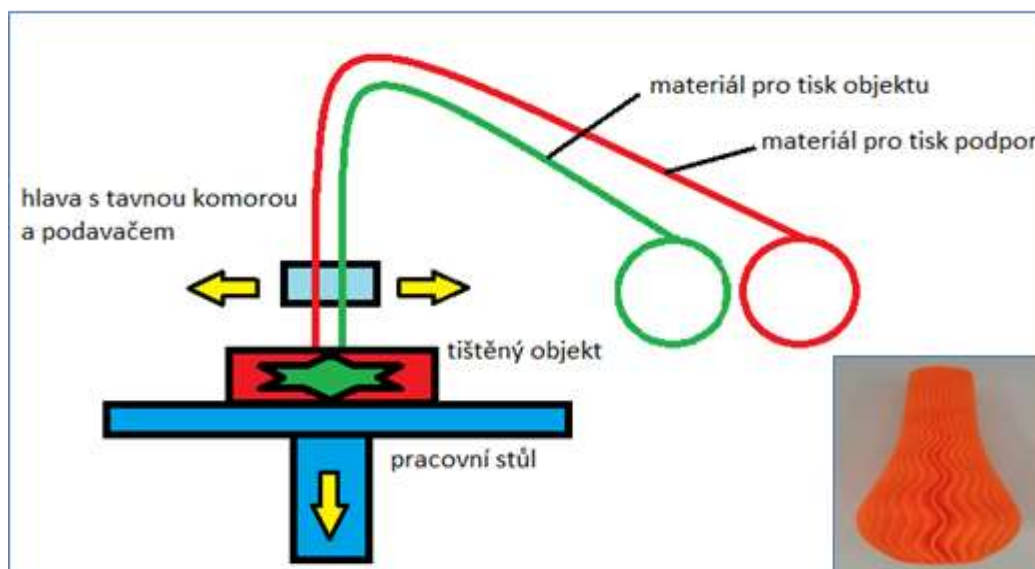
Nevýhody:

- malá rychlost
- vnitřní pnutí v tištěném díle
- někdy obtížné odstraňování podpor – jsou ze stavebního materiálu

2.1.3 Fused Deposition Modeling – FDM

Stavební materiál je v podobě struny – filamentu - navinuté na cívku. Filament je odmotáván ze dvou cívek pomocí podavače a veden do tiskové hlavy. V tiskové hlavě je filament roztaven na teplotu, kdy je lepivý a je schopen se spojovat s předchozími vrstvami. Přes trysku je vytlačován na pracovní základnu, kde je nanášen po jednotlivých vrstvách a ochlazován. Teplota roztavení je volena tak, aby se jednotlivé vrstvy materiálu slepily k sobě a zároveň si zachovaly definovanou tloušťku. Pracovní prostor je obvykle ochlazován ventilátorem, aby se urychlilo tuhnutí roztaveného materiálu.

Alternativa této metody je rovněž vytlačování speciálních směsí na bázi betonu, geopolymeru apod. tryskou. Tyto materiály se rovněž dobře spojují a po určitém čase řízeně tuhnou. Tryska může být umístěna na souřadnicovém systému nebo hlavě robota. Pohyby v souřadných osách provádí mechanismus nesoucí vytlačovací trysku nebo se pohybuje pracovní stůl. [4]



Obrázek 5: Princip metody Fused Deposition Modeling a ukázka vytištěného objektu

Výhody:

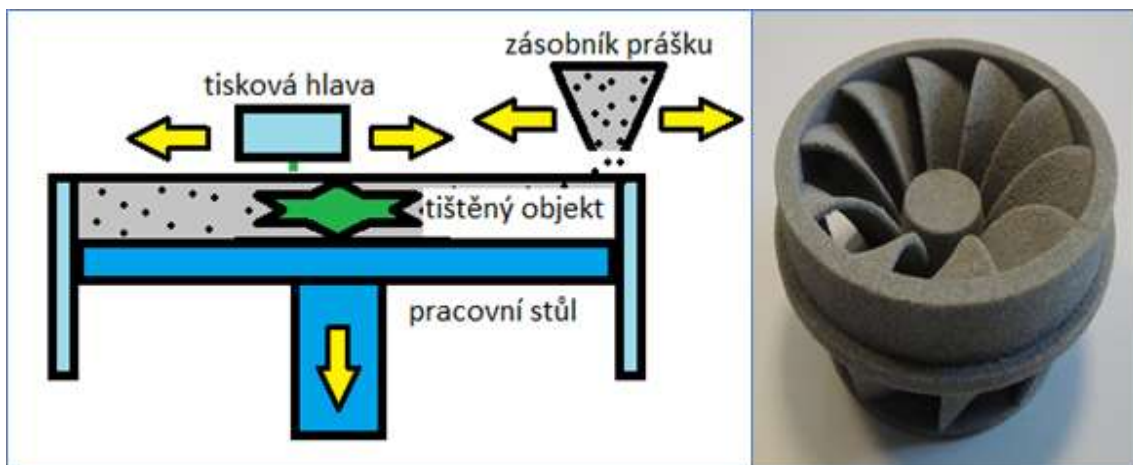
- široký sortiment materiálů - v podstatě všechny termoplasty, vosky atd.
- nízká cena tiskárny
- volně přístupná schémata tiskáren na internetu s možností si postavit tiskárnu svépomocí

Nevýhody:

- nutnost odstranění podpor
- malá pevnost vytištěného objektu,
- velká drsnost povrchu (R_a 6,4 μm a víc)
- velké vnitřní pnutí
- zdeformované detaily

2.1.4 Multi Jet Fusion – MJF

Metoda je též nazývána Binder jetting. Stavební materiál je ve formě prášku. Ten je postupně po vrstvách nanášen na pracovní stůl. Každá vrstva je spojena tekutým pojivem, nanášeným ve formě kapiček z tiskové hlavy (podobné jako v inkoustové tiskárně) na místa, kde má dojít k vytvrzení. Vytvrzování pojiva může být iniciováno teplem, UV zářením nebo aktivátorem vmíchaným do práškového stavebního materiálu. Před nanesením další vrstvy se pracovní stůl posune dolů o tloušťku vrstvy [6].



Obrázek 6: Princip metody Multi Jet Fusion a ukázka vytištěného objektu

Výhody:

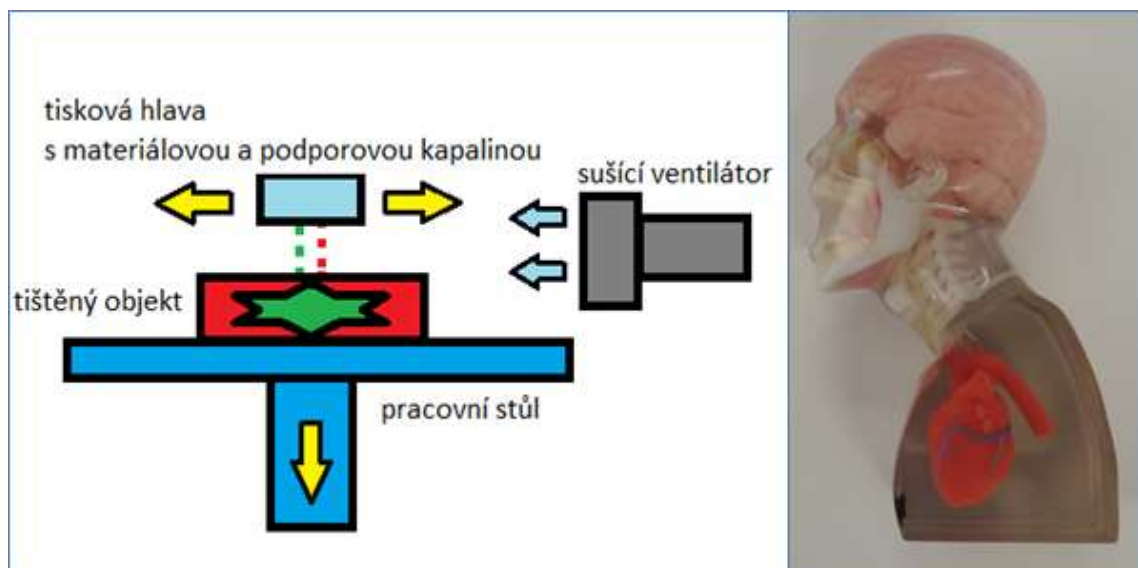
- široká škála stavebních materiálů i pojiv
- možnost mísit různé typy materiálů
- možnost recyklace podporového materiálu
- velké rozměry tiskového prostoru

Nevýhody:

- porézní struktura
- velké množství podporového materiálu

2.1.5 Material jetting

Metoda je též nazývána Polyjet. Kapalný stavební materiál je nanášen na pracovní stůl v podobě kapiček z tiskové hlavy a každá vrstva je následně vytvrzena. Pracovní stůl se po vytištění každé vrstvy posune o tloušťku vrstvy dolů. Tisková hlava může mít velké množství trysek s různými typy stavebních i podporových materiálů, které lze během tisku kombinovat a mísit. [4]



Obrázek 7: Princip metody Material jetting

Výhody:

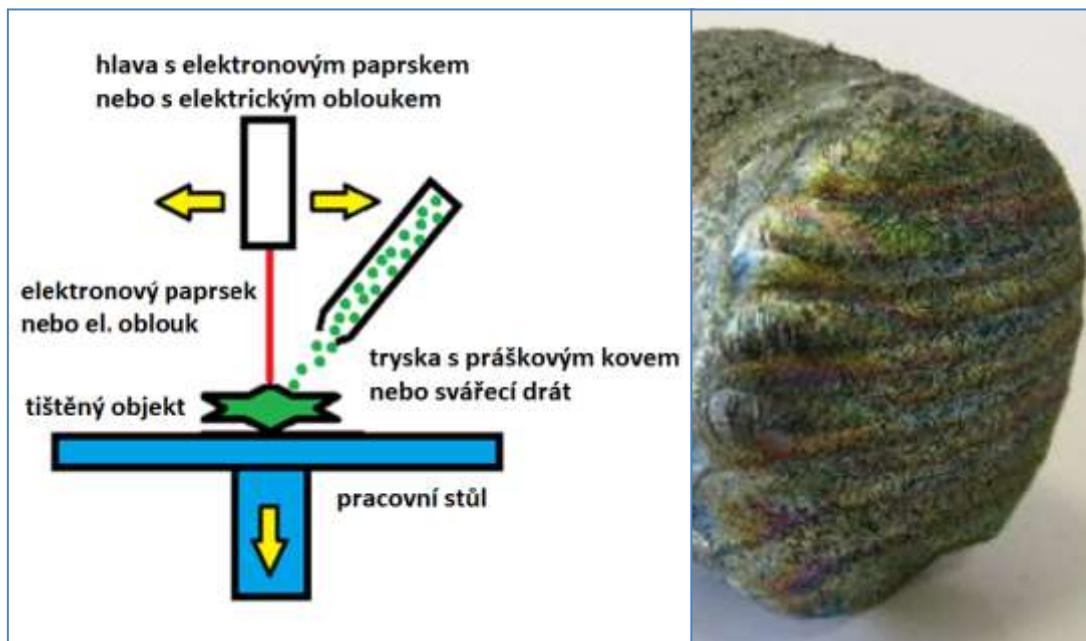
- možnost tisku různobarevných objektů
- možnost mísit barvy
- měkké, pružné a tvrdé materiály
- možnost tisku neprůhledných i čirých materiálů
- tvorby digitálních materiálů
- velmi dobře vytištěné detaily.

Nevýhody:

- vysoká cena tiskárny a tisku
- dlouhé časy tisku
- materiály jsou obvykle citlivé na UV záření a mění své vlastnosti
- nutnost odstraňování podpor

2.1.6 Electron Beam Melting – EBM

Metoda je též nazývána Directed energy deposition – DED nebo WAAM. Stavební materiál je kovový prášek nebo drát spékáný pomocí řízeného elektronového paprsku (svazku) nebo elektrického oblouku. Jde v podstatě o prostorově řízené navařování materiálu. [4]



Obrázek 8: Princip metody Electron Beam Melting a ukázka vytištěného objektu

Výhody:

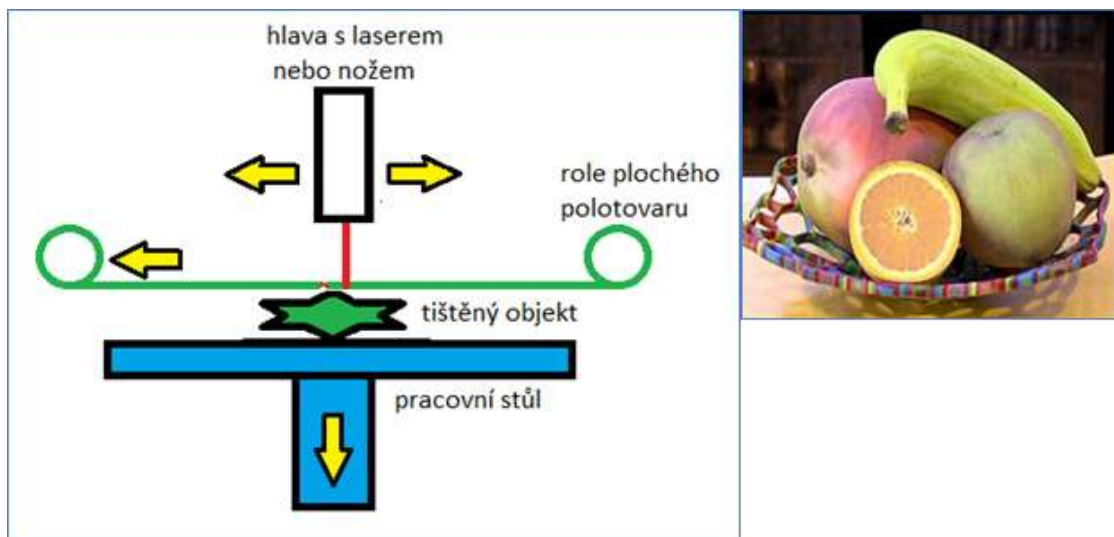
- tisk velmi pevných kovových objektů
- možnost dotisku na již hotové díly
- možnost mísit různé kovy
- možnost tisku velkých objektů až v řádech metrů
- jednoduchost tiskárny

Nevýhody:

- velké vnitřní pnutí
- absence podporového materiálu
- obtížné odstraňování podpor – jsou ze stavebního materiálu

2.1.7 Sheet lamination

Stavební materiál je v podobě plochého polotovaru v arších nebo ve svitcích. Může to být papír, plasty, kovové plechy a desky na bázi dřeva. Z polotvarů jsou pomocí řezacího nože, vodního paprsku nebo laseru postupně vyřezávány tvarové obrazce. Ty jsou na sebe následně vrstveny a lepeny. Tato technologie bývá občas zkombinovaná s barevnou tiskárnou, která před vyříznutím tvarů nejprve vytiskne barevné okraje obrazců. Po jejich následném navrstvení a slepení vznikne trojrozměrný barevný objekt. [4]



Obrázek 9: Princip metody Sheet lamination a ukázka vytištěného objektu

Výhody:

- jednoduchost tiskárny
- různorodost stavebních materiálů
- velikost tištěných objektů až v řádech metrů

Nevýhody:

- velké množství odpadního materiálu
- schodovitý povrch

Všechny výše popsané technologie 3D tisku jsou v povědomí technické veřejnosti jak v Evropě, tak i v České republice.

2.2 Situace ve slévárenství a 3D tisku písku v průmyslu

Všechny zmiňované technologie jsou poměrně známé, běžně rozšířené jak v průmyslu, vývoji a ve školství, tak i a jejich použití se během několika posledních let stalo běžnou součástí výrobních procesů při výrobě prototypů, funkčních, ale i sériových výrobků a přípravků.

Nejméně rozšířenou technologií je 3D tisk písku zvaný též Sandprint. Jde o variantu technologie Multi Jet Fusion – MJF (viz. kapitola 2.1.4) určenou primárně pro tisk prototypových a malosériových slévárenských forem.

První zařízení pro Sandprint v Evropě byla vyvinuta v Mnichově v roce 1995. Ke vzniku se hlásí dvě firmy, a to Voxeljet a Extrude hone, později v roce 2007 přejmenovaná na ExOne. První patent na 3D tisk písku byl udělen v roce 1998 firmě Voxeljet. Obě firmy čerpaly výsledky z procesů vynalezených na Massachusetts Institute of Technology (MIT) a Technische Universität München – Technické universitě v Mnichově. Voxeljet a ExOne byly původně jednou firmou, která se rozdělila na dvě. ExOne si ponechala know-how na výrobu tiskových hlav a tiskáren na tisk z písku. Voxeljet vyvíjela dále tisk z kovových, plastových i voskových prášků a jejich postprocessing. Dále vyvíjela využití plastových a voskových dílů pro technologii lití na vytavitelný model [7].

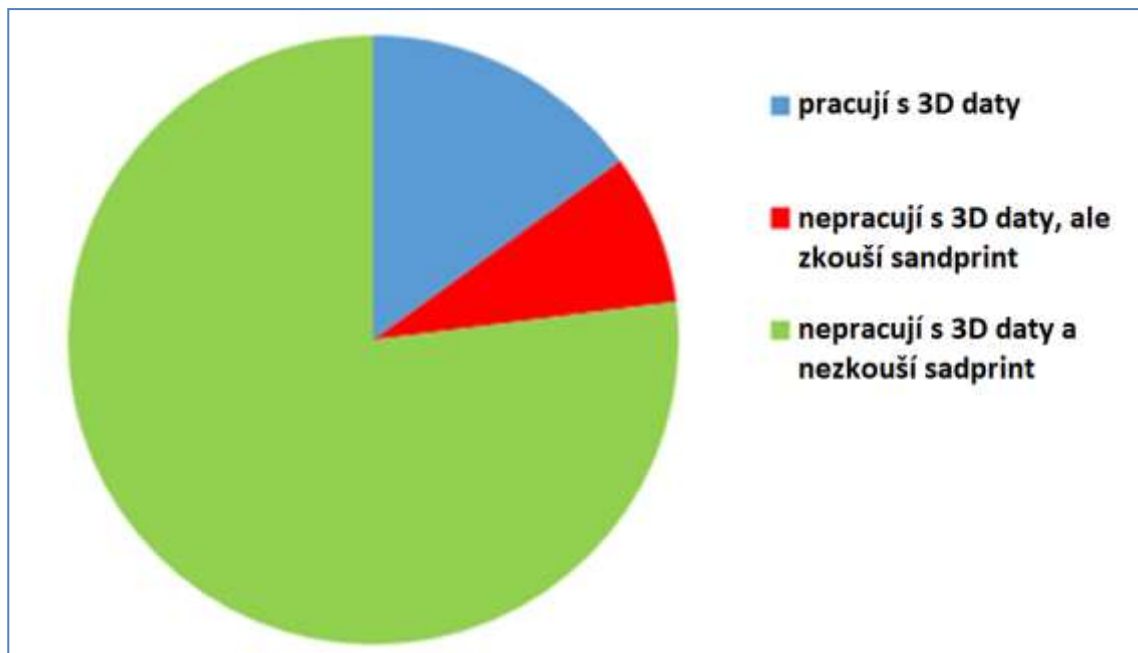
Podle údajů od firmy ExOne bylo do roku 2021 v celém světě prodáno 173 tiskáren. V tabulce 1 je uveden počet tiskáren v jednotlivých zemích.

Tabulka 1: Počet tiskáren firmy ExOne v jednotlivých zemích [8] **Chyba! Chybné propojení.**

V České republice jsou pouze dvě tiskárny pro tisk z písku. Jednu s označením S-Max vlastní firma Modelárna-Liaz v Liberci a druhou menší s označením S15 vlastní firma 3D tiskárna Turnov. Princip, písek i pojivo – binder, aktivátor i čistič – cleaner jsou u těchto dvou tiskáren shodné. Tiskárny se liší pouze zrnitostí písku a velikostí pracovního prostoru.

Ve firmě Modelárna – Liaz je používán písek o zrnitosti 0,19 mm a pracovní prostor má rozměry 1 800 x 1 000 x 700 mm. Ve firmě 3D tiskárna Turnov je používán písek o zrnitosti 0,14 mm a pracovní prostor má rozměry 1 499 x 762 x 711 mm.

Podle průzkumu provedeného firmou ML ve spolupráci s firmou ExOne ve slévárnách v České republice, Německu, Rakousku a Polsku se ukázalo, že povědomí o sandprintu je velice malé. Většina sléváren investovala do technologie přípravy taveniny, lití a kontroly odlitků, ale není ani vybavena na práci s 3D daty.



Obrázek 10: Graf ukazující poměr počtu sléváren využívajících technologii sandprint

Výše uvedený graf na obrázku 10 ukazuje, že v České republice je pouze necelých 10 % sléváren, které mají zkušenost s technologií sandprint.

Firma Modelárna Liaz spol s r.o. je poslední pokračovatel slavné automobilové značky LIAZ. Nyní je Modelárna – Liaz považována za jednu z nejlépe vybavených



nástrojářen a modelářen v Evropě. Je zapojena do celosvětové produkce a vývoje v oblasti automobilového průmyslu, letectví, energetiky a částečně i moderního umění. Má široké portfolio technologií: obrábění CNC i klasické, vlastní slévárnu hliníkových slitin, vstřikolis na plasty, PUR technologie, lakovnu, technologie na výrobu kompozitních dílů, měrové středisko, laser scanner pro reversní inženýrství, a především zkušený tým konstruktérů a technologů.

S technologií sandprint Modelárna – Liaz pracuje od roku 2014 a v roce 2015 jako první firma v České republice zakoupila tiskárnu S-Max pro tisk forem na odlévání ve vlastní slévárně. Postupem času začala provozovat tuto tiskárnu i pro komerční použití pro tisk forem ostatním slévárnám v Evropě a podařilo se jí nasbírat široké know – how v oblasti odlévání kovů do forem vyrobených metodou sandprint. Po celou dobu používání této technologie spolupracuje s univerzitami a výzkumnými ústavy.

Získávání údajů zpětnou vazbou od ostatních sléváren, které nakupují a využívají tištěné formy je složité.

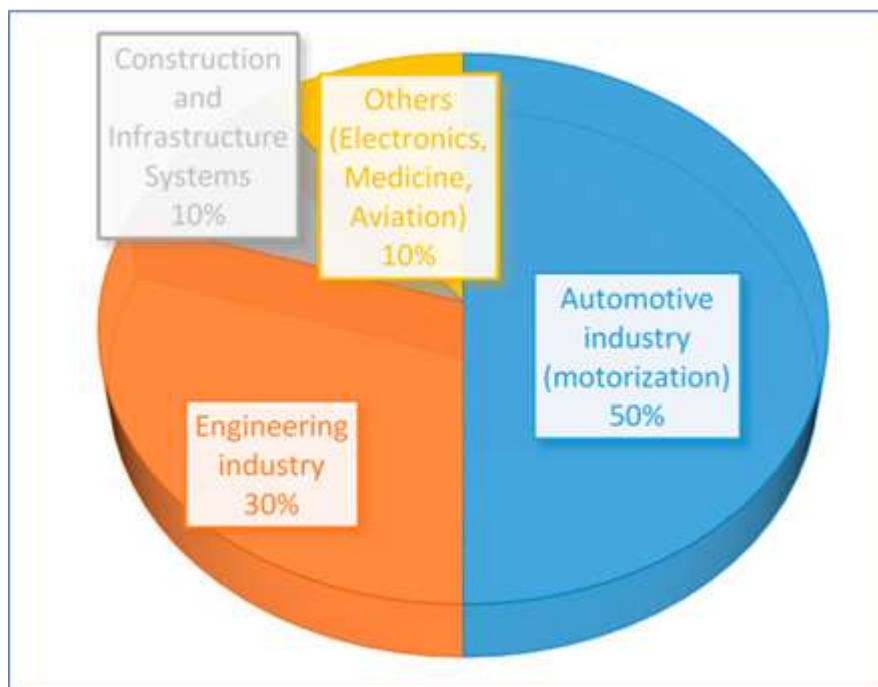
Vedení firmy Modelárna – Liaz dalo souhlas k provádění většiny experimentů a dalo k dispozici část kapacity na 3D tiskárně S-Max za účelem experimentálních prací v rámci této disertační práce.

Slévárenství je v oblasti strojírenské výroby silně zastoupená technologie. Proto jakákoliv optimalizace výroby přináší velké úspory.

Podle výzkumu odborníků ze School of Engineering and Digital Sciences bylo v roce 2010 vyprodukováno 44 milionů tun odlitků z šedé litiny, 15 milionů tun odlitků z neželezných kovů a 10 milionů tun odlitků z oceli. [28]

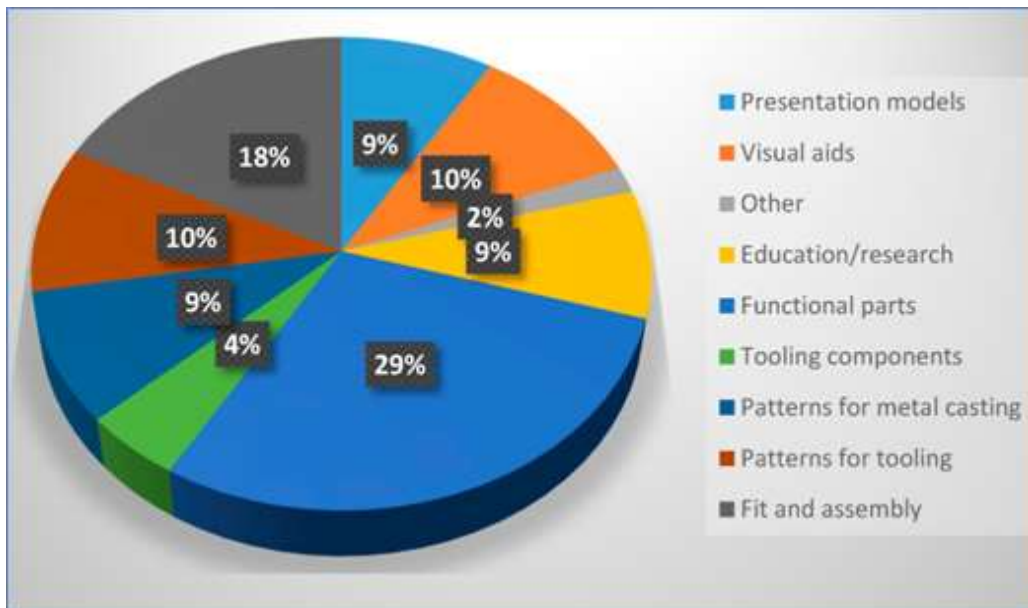
Právě produkce odlitků z šedé litiny je považována za hlavní ukazatel spotřeby kovu ve slévárenství.

Na obrázku 11 je viditelný poměr využití slévárenské technologie ve čtyřech hlavních sektorech průmyslu. Automobilový průmysl zde využívá 50 % slévárenské produkce.



Obrázek 11: Rozložení trhu pro slévárenský průmysl [28]

Výsledky průzkumu ze stejného zdroje [28] ukazují poměr jednotlivých způsobů využití aditivních technologií v různých oborech.



Obrázek 12: Poměr využití aditivních technologií [28]

Zastoupení jednotlivých oborů dle obrázku 12:

| | |
|------------------------------------|-----|
| Prezentační modely | 9% |
| Vizualizace | 10% |
| Ostatní | 2% |
| Vzdělání/výzkum | 9% |
| Funkční díly | 29% |
| Součásti forem (slévárenská jádra) | 4% |
| Přípravky pro slévárství | 9% |
| Modely pro formování | 10% |
| Pasování a montáž | 18% |

Z obrázku 12 jsou patrné dvě důležité informace:

- 1) Nejvíce zaujímá výroba funkčních dílů – 29 %
- 2) Zastoupení v oblasti slévárství (součásti forem 4 %, přípravky pro slévárství 9 %, modely pro formování 10 %) představuje druhé největší zastoupení 23 %.

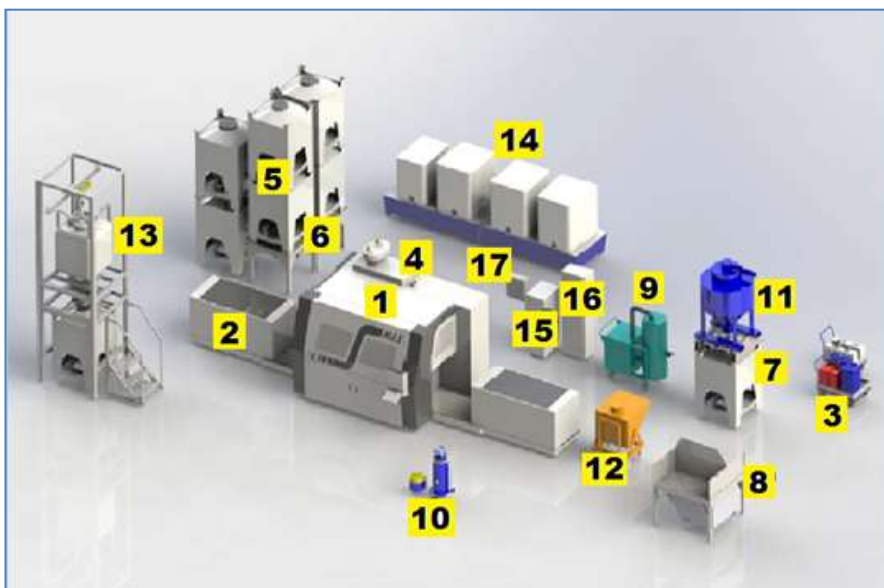
2.3 Tiskárna S-Max od firmy ExOne

Princip tiskáren i tisku od výrobce ExOne a Voxeljet je v podstatě stejný. Protože se všechny experimenty budou provádět na tiskárně S-Max ve firmě ML, je zde uveden podrobný popis této tiskárny. [9P]



Obrázek 13: Tiskárna písku S-Max od firmy ExOne [7]

Tiskárna S-Max se skládá z vyhřívaného pracovního prostoru s přípravou písku, nanášecím zařízením a tiskovou hlavou. Aby bylo možné na tomto zařízení tisknout, musí být tiskárna doplněna o další obslužné periferie. Ty lze podle požadavků na množství tisku, zástavbový prostor apod. různě konfigurovat [7].



Obrázek 14: Schéma pracoviště pro 3D tisk písku [7]

Jednotlivá pracoviště, resp. zařízení na Obrázku 14 představují:

- 1- tiskárna S-Max
- 2- pracovní stůl (jobbox) - pro vyšší produktivitu je tiskárna vybavena 2 jobboxy
- 3- vozík s chemikáliemi – binder a cleaner
- 4- dávkovací jednotka písku
- 5- transportní kontejner na nový písek
- 6- základna pro umístění boxů s pískem
- 7- transportní kontejner pro recyklovaný písek
- 8- dokončovací stůl s výklopným sběrným kontejnerem na čištění vytištěných forem
- 9- vysavač pro odsávání písku
- 10- malý vysavač pro separátor prachu
- 11- separátor na recyklovaný písek
- 12- ruční kontejner na recyklovaný písek
- 13- stojan na vysypávání pytlů s novým pískem (bigbagů)
- 14- automatický dávkovač chemikálií (pojiva, aktivátoru a čističe)
- 15- rezervní zdroj se záložními bateriemi
- 16- trafostanice
- 17- elektro jištění

2.3.1 Princip sandprintu na 3D tiskárně

Tisk se provádí na základě vstupních CAD dat ve formátu STL. Tiskárna využívá princip přímého tisku pískových forem a jader pro odlévání kovů. Spotřební materiál tiskárny je křemičitý písek a furanová pryskyřice [7, 11, 46]. Výhodou sandprint technologie je, že není ovlivněna tvarovou složitostí výrobků. Omezení je pouze v jemných detailech, kdy hrozí ulomení příliš drobných části formy. Rozměry pracovního prostoru jsou dány typem tiskárny a mohou být až v řádech metrů. Konstrukce je provedena tak, že tisk se musí provádět vždy na celé ploše pracovní plochy do výšky určené pouze podle nejvyšším tisknutým dílem do maximální hodnoty výšky pracovního prostoru [1]. Tisk větších forem, než je pracovní prostor, je možný tak, že se forma datově rozdělí a tiskne se po menších částech. Ty se následně po vytisknutí spojí např. slepením slévárenským tmelem.

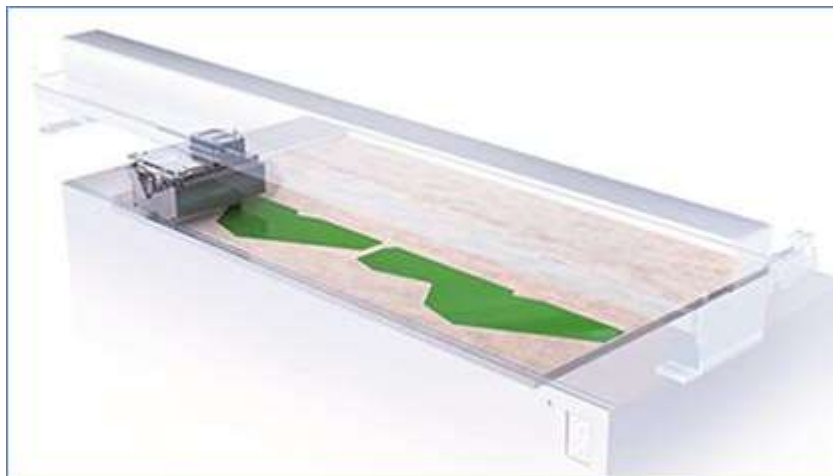
Postup tisku probíhá následujícím způsobem:

1. Nanesení tenké vrstvy písku nasyceného přesným množstvím aktivátoru (jedné složky pryskyřice) po celé ploše tištěné oblasti. Tloušťka vrstvy je dána zrnitostí použitého písku a bývá obvykle dvojnásobek velikosti zrna. V našem případě jde o tloušťku 0,4 mm.



Obrázek 15: Sandprint – nanesení vrstvy písku s aktivátorem [9]

2. Nanesení druhé složky – pojiva pouze v oblasti tištěných tvarů pomocí tryskové hlavy a prosycení v celé tloušťce vrstvy. Reakcí mezi aktivátorem a binderem dojde k vytvrzení a zpevnění této vrstvy pouze v místech, kde vznikají tištěné tvary. Nevytvrzený písek slouží jako podpůrný materiál pro další vrstvy tisku.



Obrázek 16: Sandprint – selektivní nanesení binderu pomocí tiskové hlavy s tryskami [9]

3. Po dokončení tisku jedné vrstvy následuje posunutí dna jobboxu směrem dolů o tloušťku vrstvy tisku.



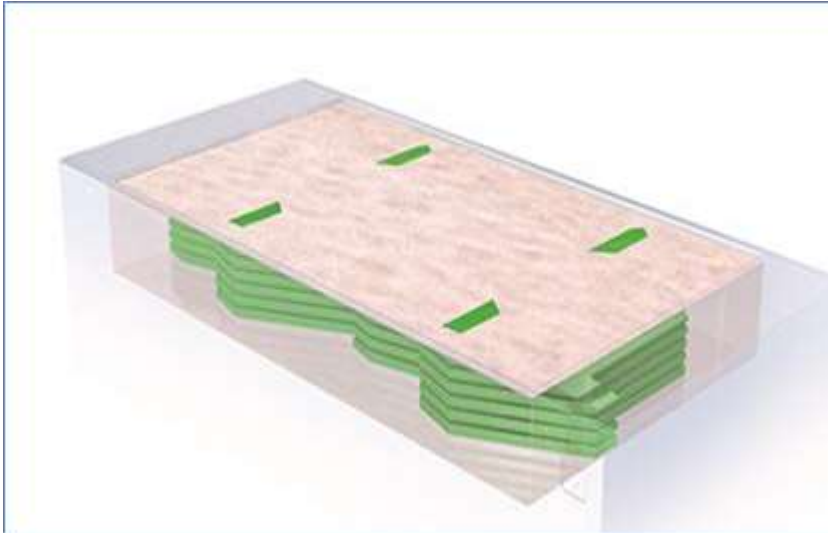
Obrázek 17: Sandprint – vytištěná plocha jedné vrstvy písku [9]

4. Nanesení další vrstvy písku s aktivátorem a opakování celého procesu tisku až do požadované výšky tisku.



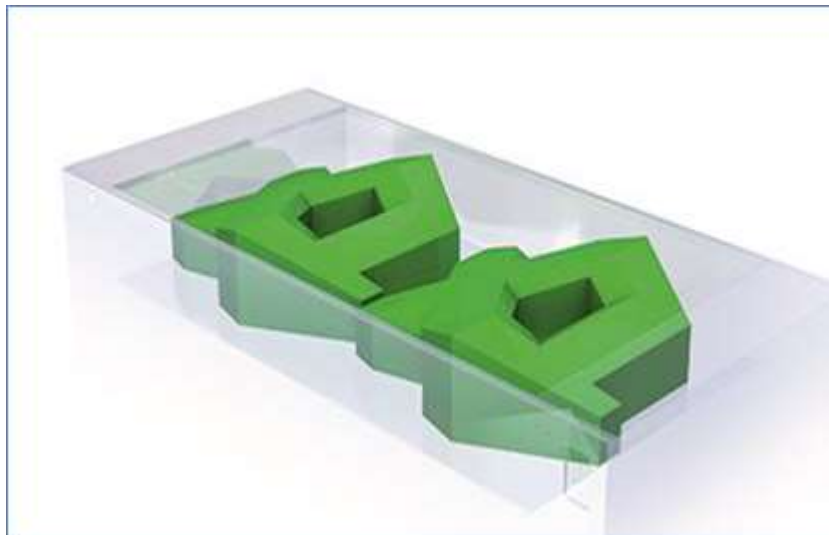
Obrázek 18: Sandprint – nanášení další vrstvy písku [9]

5. Dokončení tiskového procesu a dokončení reakce pojiva a aktivátoru v jobboxu. Na povrchu pískové plochy jsou viditelné pouze obrazce poslední operace tisku. Vytisknuté objekty musí obvykle několik hodin vyzrát, aby dosáhly požadované pevnosti.



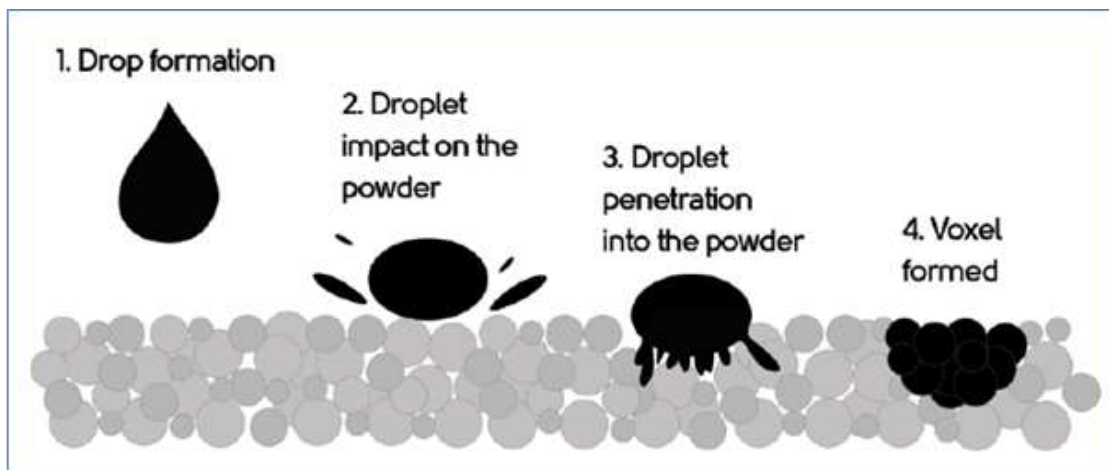
Obrázek 19: Sandprint – dokončený tisk [9]

6. Odsátí nevytvrzeného písku pomocí vysavače, vyjmutí a očištění vytisknutého dílu. Odsátý písek, obsahující aktivátor, je znovu použit k dalšímu tisku.



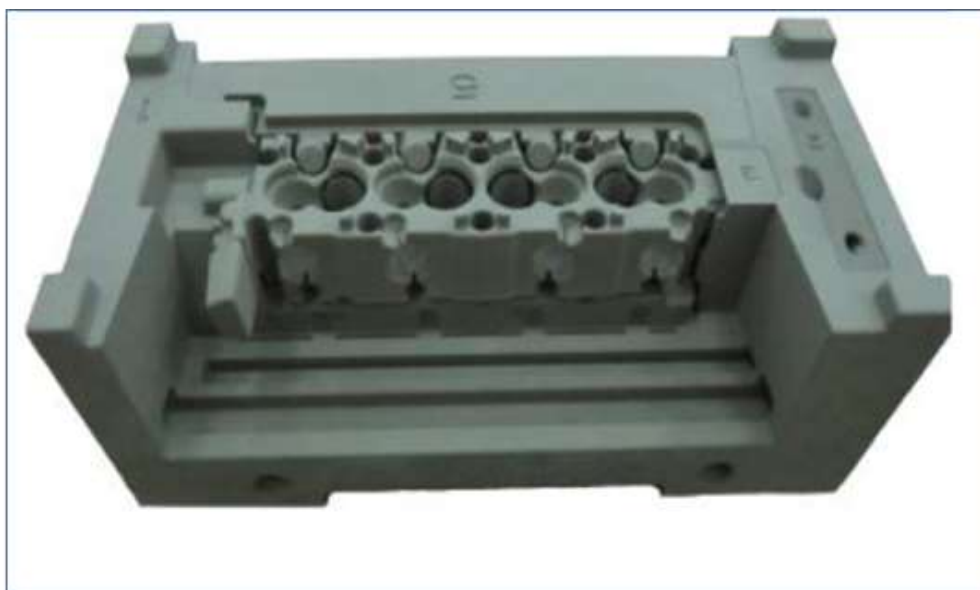
Obrázek 20: Sandprint – vyčištěné díly [9]

Cílem celého procesu je dokonale spojit jednotlivá zrnka písku, ale nevyplnit prostor mezi nimi. Tištěná struktura musí mít požadovanou pevnost, ale musí zůstat prodyšná.



Obrázek 21: Sandprint – princip vnikání kapky pojiva mezi zrna písku smíchaného s aktivátorem [8]

1. Vystříknutí kapky pojiva z trysky v tiskové hlavě
2. Dopadnutí kapky na povrch naneseného písku
3. Vsáknutí kapky mezi zrna písku
4. Slepění zrn písku



Obrázek 22: Polovina pískové formy o rozměrech 600x 300x 250 mm vytištěná technologií sandprint. Jde o formu na odlití hlavy čtyřválcového motoru

2.3.2 Technické parametry použitého zařízení – 3D tiskárny S–Max

Vzhledem k zatím malému počtu 3D tiskáren na technologii sandprint (2 ks v celé České republice) bude využita tiskárna S-Max ve firmě Modelárna-Liaz s těmito parametry:

Velikost pracovního prostoru: 1 800 x 1 000 x 700 mm [9P]

Doba tisku celého pracovního prostoru: 16 hod [9P]

Pevnost tištěného písku v ohybu: 1,8 – 2,2 N/mm² [9P]

Přesnost tiskového mechanismu: 0,3 mm [9P]

Prodyšnost: 180 - 300 GP (normální jednotka prodyšnosti) resp. 300–500 SI [9P]

Tloušťka tištěné vrstvy: 0,4 mm [9P]

Velikost zrna písku: 0,19 mm [6P]

Maximální lící teplota odlévaného kovu: 1 500 °C [9P]

Měrná hmotnost tištěného písku: 1 700 kg/m³ (0,0017 g/mm³)

Formát zadávacích dat: STL [16]

Písek: FS003, zrnitost 0,19 mm, teplota tavení 1 550 °C [7]

Chemické složení písku FS003: ukazuje tabulka 2:

Tabulka 2: Chemická analýza písku FS003[7]

| Složka | Obsah [%] |
|--------------------------------|-----------|
| SiO ₂ | 99,1 |
| Al ₂ O ₃ | 0,22 |
| TiO ₂ | 0,21 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,085 |

Údaje v tabulce 2 pocházejí od výrobce tiskárny a dodavatele spotřebních materiálů (písku, pojiva, aktivátoru, čističe).

Ze součtu procentuálních obsahů vyplývá, že písek obsahuje ještě 0,385 % dalších příměsí.

- Pojivo (binder): Furanová pryskyřice obsahující převážně furfurylalkohol [35, 5P]
Aktivátor: Slouží k vytvrzení pojiva. Kapalina na bázi kyseliny arylsulfonové s obsahem 5% kyseliny sírové
Čistič (cleaner): Rozpouštědlo na alkoholové bázi (slouží k čištění systému rozvodu binderu a trysek tiskové hlavy)

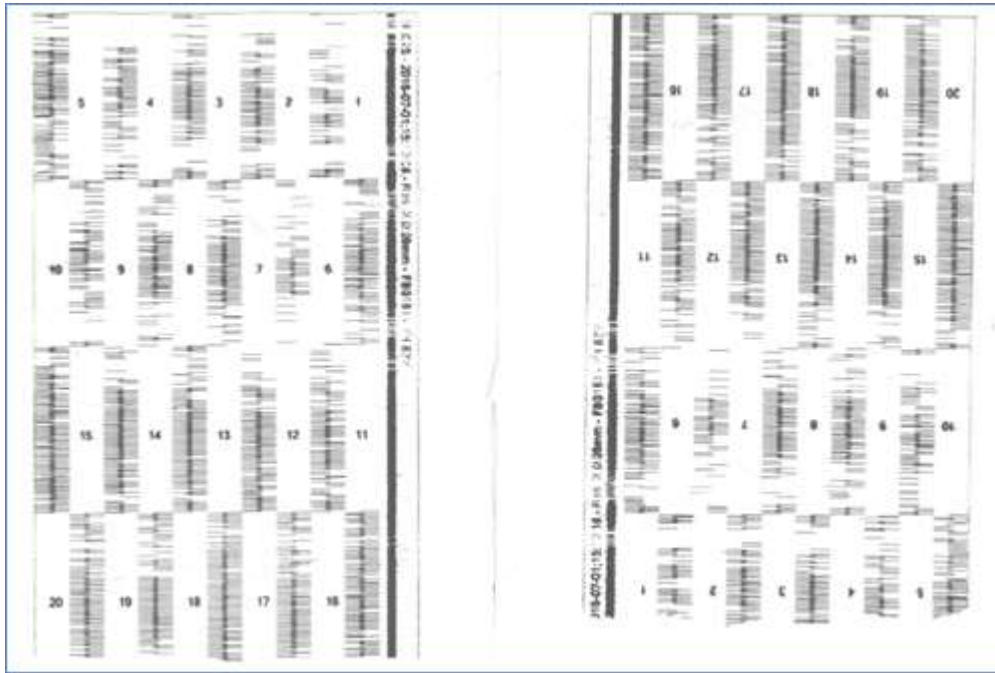
Mísící poměry jsou udány výrobcem v množství na jeden plný jobbox s využitím 50 % tištěného prostoru a s použitím 30 % recyklovaného písku [7]. Pro požadované dosažení pevnosti tištěné směsi lze ještě přesně doladit množství aktivátoru a binderu v rozmezí limitovaném výrobcem tiskárny.

Tabulka 3: Mísící poměry složek pro tiskárnu S – Max [7]

| Složka | Obsah [l] |
|-----------|-----------|
| Aktivátor | 2,2 – 2,6 |
| Binder | 14 – 18 |
| Písek | 1 260 |
| Cleaner | 8 – 12 |

Tyto údaje jsou od výrobce ExOne a vykazují velké rozptyly. Je to částečně dáno tím, že se spotřeby jednotlivých složek liší využitím pracovního prostoru, znečišťováním trysek tiskové hlavy, doladováním pevnosti vytištěných dílů úpravou množství binderu a aktivátoru.

Na obrázku 23 je vidět testovací tisk tiskové hlavy. Každá jednotlivá čárka ukazuje funkčnost každé trysky. Když tryska nefunguje, může být zanesená nečistotami v pojivu nebo poškozená mechanicky, popř. nefunguje její elektrická část. Pro správnou funkci 3D tiskárny nesmí být nefunkčních trysek víc než 3 %. Pokud je to více, musí se celá tisková hlava vyměnit. Její životnost při denním provozu je cca 1 rok.



Obrázek 23: Testovací tiskové hlavy

Technologie sandprint je v nevelké míře rozšířená a využívána po celém světě a problematikou zlepšení jejího využití se zabývají jak výrobci samotných tiskáren ExOne a Voxeljet, tak i slévárny používající tuto technologii a vědecká pracoviště na univerzitách a ve vědeckých a technologických centrech, avšak pouze v rovině slévárenství. Slévárny své know - how v tomto oboru nezveřejňují.

Firmy vyrábějící 3D tiskárny pro sandprint uvádějí pouze základní informace o mechanických vlastnostech tištěné struktury.

2.4 Problematika použití technologie sandprint ve slévárenství

Aby bylo možné technologii sandprint efektivně využívat, je nutné znát ekonomickou i technickou stránku použití, určité výhody, zákonitosti a pravidla i možné problémy spojené s touto poměrně novou technologií. Výrobce tiskáren pro sandprint dává k tiskárnám informace hlavně o vlastnostech tištěné struktury.

Přípravu forem a jejich použití je možné rozdělit do následujících bodů:

Ekonomické aspekty

Práce s 3D daty

Vtoková soustava a odvětrání formy

Odlévání detailů (drážek, děr, žeber)

Simulace lícího procesu

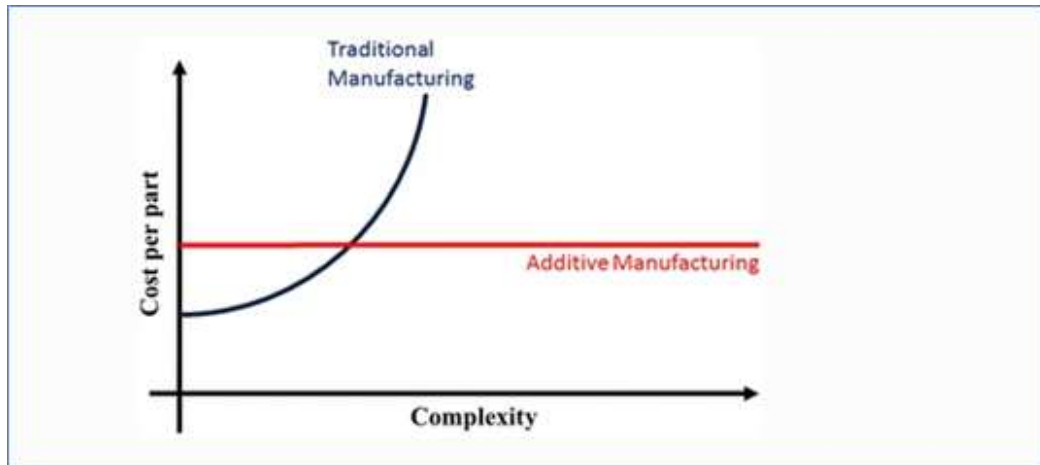
Konstrukce a rozměry formy

2.4.1 Ekonomické aspekty

Před samotným rozhodnutím pro použití technologie sandprint je nutné zvážit, zda je to ekonomicky nebo technicky výhodné. V případech velice složitých odlitek, které nelze konvenčním postupem vyrobit, se sandprint použije i v případě vyšších nákladů na odlitek. Musí se zvažovat i další výhody sandprintu jako je snížení zmetkovitosti, snížení spotřeby roztaveného kovu na lící soustavu, úkosy, přídavky na obrábění a úspory při obrábění. Dále je třeba vzít v potaz i vedlejší ukazatele, jako jsou úspory za skladování modelů, zjednodušení úprav, časová úspora a snížení nákladů na personál slévárny.

- 1) Podle průzkumu mezi 100 slévárnami v USA, modely a jejich skladování tvoří největší problém ve výrobě malosériových odlitek. Vysoká pořizovací cena 3D tiskáren písku a proti tomu vysoké nároky na výrobu a skladování modelových technik nabízí možnost zřízení dodavatelských center pro výrobu pískových tištěných forem, které by je dodávaly jednotlivým slévárnám. Jednalo by se hlavně o výrobu forem pro prototypové, tvarově složité díly v malých sériích. [46]
- 2) Technologie sandprint umožňuje efektivně a operativně vyrábět odlitky a zvýšit odlévací výkon sléváren. Uspoří značné množství materiálu, jak na modely, pískové formy. Ušetří se i kov na samotné odlití odlitku. Podle průzkumu odborníků je efektivita výroby za použití technologie sandprint okolo 92 %. [38]
- 3) Technologie sandprint umožňuje vyrábět slévárenské formy bez jakýchkoli požadavků na nástroje, jako jsou modely, jaderníky, nálitky apod.

Navíc je možné zvýšit rychlost technologické přípravy, snížit zmetkovitost, zoptimalizovat smrštění, zkrátit dodací dobu a vytvářet velice složité odlitky bez zvyšující se ceny. Zatím co u konvenční výroby cena se složitostí odlitku prudce stoupá, tak u výroby formy pomocí technologie sandprint cena zůstává konstantní viz. obrázek 24. [35]



Obrázek 24: Závislost ceny na složitosti odlitku [35]

- 4) Technologie sandprint pomáhá zvýšit kvalitu odlitků a snížit zmetkovitost. Díky digitální podobě odlitku i licí formy ve 3D datech mohou být provedeny analýzy za pomoci speciálních simulačních software. Na základě analýz pak je optimalizována vtoková soustava tak, aby nedocházelo k turbulencím v tavenině a aby plnicí rychlost byla konstantní. Tím se zamezí vymílání písku z formy a jeho zanesení do odlitku. Současně nedojde k oxidaci taveniny vlivem jejího víření se vzduchem. [31]
- 5) Zlepšení kvality odlitků pomocí optimalizace slévárenských forem vyrobených technologií sandprint. Pomocí optimalizace pevnosti, prodyšnosti i tuhosti lze snížit emise plynů během lití a minimalizovat hmotnost hořlavých materiálů ve formě. [44]

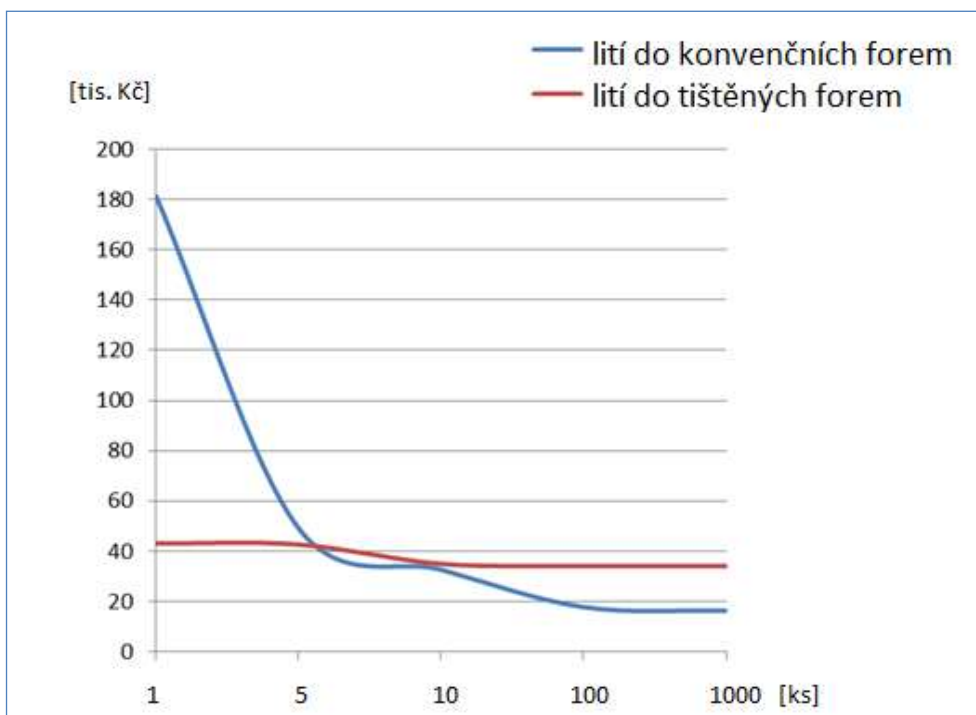
Při využívání 3D tisku je důležité ekonomické hledisko. Samotná tiskárna písku představuje investici v řádech desítek milionů Kč. Jeden litr (100 x 100 x 100 mm) vytištěného písku stojí cca 170 – 200 Kč. Oproti tomu se 3D tiskem odbourá časově

náročná výroba drahého modelového zařízení a sníží nároky na personál slévárny. Dále se při použití 3D tisku značně zkrátí realizace odlitku, a to se všemi parametry sériového výrobku. [26, 45]

Musí se také zohlednit velice náročné skladování velkého množství slévárenských modelů, které se nesmí poškodit např. vlhkem. Je třeba vzít v potaz jejich složitou evidenci a provádění změn. U technologie sandprint se pouze uchovávají 3D data v elektronické podobě a veškeré změny se provádějí softwarově. [43]

Pro porovnání byl vybrán vzorový odlitek formy na výrobu měkkých polyuretanových (PUR) dílů s hmotností 60 kg. Těchto odlitků se v Modelárně Liaz ročně odlije cca 800 ks a je o nich vedena přesná technologická i ekonomická evidence.

Z obrázku 25 je patrné, že do cca 5 ks se vyplatí sandprint a nad tuto hranici je výhodnější vyrobit modelové zařízení a využít konvenční formování nebo od vyšších počtů vyrobit kokilu. Z toho plyne že sandprint je více vhodný pro kusovou výrobu a prototypování.



Obrázek 25: Graf ukazující porovnání nákladů v závislosti na množství odlitků vyráběných konvenčně a za pomoci technologie sandprint

Před samotnou výrobou odlitku je nutné provést technologickou přípravu výroby (TPV).

TPV zahrnuje všechny operace nutné pro odlití odlitku.

Použití technologie konvenčního formování zahrnuje obvykle tyto procesy:

1) Konstrukce odlitku

Ta je obvykle dána zákazníkem slévárny, ale může se vytvářet např. metodou reversního inženýrství, tedy podle fyzického kusu.

2) Technologické úpravy odlitku

Zde se jedná o přidání přídavků na obrábění, úkosu na odformování, zaslepení děr, které mají být přesné a budou se vrtat, a aplikace smrštění.

3) Vtoková soustava

Ta se v tomto případě musí volit s ohledem na vedení dělicí roviny a odformování modelu.

4) Konstrukce modelového zařízení (MZ)

Sem patří konstrukce modelů pro vytvoření formy a vtokové soustavy, dále formovacích desek.

5) Programování MZ

Příprava programů a technické dokumentace na CNC stroje.

6) Frézování MZ

MZ lze vyrábět i ručně podle výkresové dokumentace např. u velkých modelů, ale většinou se dnes obrábí z polyuretanových bloků na CNC strojích.

7) Ruční dokončení MZ

Tato etapa přípravy zahrnuje odstranění stop po obrábění a dokonalou úpravu povrchu – leštění, lakování, značení dílů modelu.

Použití technologie sandpřít výrazně zkracuje TPV, celá příprava probíhá softwarově na 3D modelu a zahrnuje pouze tyto procesy:

1) Konstrukce odlitku

Ta je obvykle dána zákazníkem slévárny, ale může se vytvářet např. metodou reversního inženýrství, tedy podle fyzického kusu.

2) Technologické úpravy odlitku

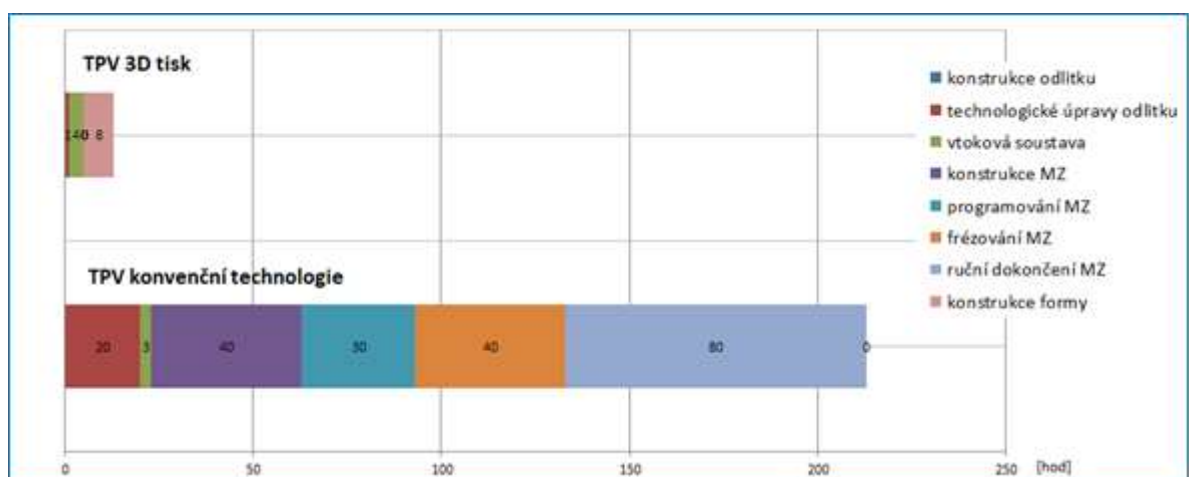
Zde jde pouze o zaslepení děr, které mají být přesné a budou se vrtat. Následuje přidání přídavků na obrábění a aplikace smrštění.

3) Vtoková soustava

Zde se bere ohled pouze na ideální funkci vtokové soustavy, tvarové omezení je minimální.

4) Konstrukce formy

Zde se stanoví dělicí rovina, vnější rozměry a odlehčení a manipulační otvory. Zcela zde odpadají činnosti spojené s výrobou MZ, vytiskne se přímo forma dle 3D dat.



Obrázek 26: Porovnání časů technologické přípravy (TPV) pro konvenční lití a lití do forem vyrobených technologií sandpřít

Z obrázku 26 je zřejmé, že využití technologie sandpřít výrazně zkracuje dobu technické přípravy. [42]

Rozdíl je i v tom že v případě sandrintu musí být konstruktér zároveň i slévárenský technolog. Pro vytvoření formy na odlití není potřeba zkušený formíř. Tím se zcela mění princip TPV (technologické přípravy výroby).

Následující tabulka 4 a obrázek 26 ukazují, že došlo ke zkrácení doby výroby z 225 na 25 hodin a snížení ceny jednoho odlitku ze 181 260 Kč na 43 180 Kč.

Tabulka 4: Porovnání cen výroby odlitků konvenční technologií a pomocí sandrintu

| typ nákladů | technologická operace | konvenční lití | | | 3D tisk | | |
|---------------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-----------|---------|--------------|-----------|
| | | čas [h] | sazba [Kč/h] | cena [Kč] | čas [h] | sazba [Kč/h] | cena [Kč] |
| jednorázové náklady na tech. přípravu | konstrukce odlitku | 0 | 700 | 0 | 0 | 700 | 0 |
| | technologické úpravy odlitku | 20 | 700 | 14000 | 1 | 700 | 700 |
| | vtoková soustava | 3 | 700 | 2100 | 4 | 700 | 2800 |
| | konstrukce MZ | 40 | 700 | 28000 | 0 | | 0 |
| | programování MZ | 30 | 700 | 21000 | 0 | | 0 |
| | frézování MZ | 40 | 1200 | 48000 | 0 | | 0 |
| | ruční dokončení MZ | 80 | 650 | 52000 | 0 | | 0 |
| | konstrukce formy | 0 | 0 | 0 | 8 | 700 | 5600 |
| celkem TP | 213 | | 165100 | 13 | | 9100 | |
| náklady na výrobu jednoho odlitku | ruční formování | 6 | 800 | 4800 | 0 | | 0 |
| | tisk formy | 0 | | 0 | 5 | 4200 | 21000 |
| | náklady na písek a likvidaci | | | 360 | | | 1080 |
| | příprava formy | 2 | 500 | 1000 | 4 | 500 | 2000 |
| | lití | 4 | | 10000 | 4 | | 10000 |
| | celkem odlitek | 12 | | 16160 | 13 | | 34080 |
| | celkem za 1 odlitek | 225 | | 181260 | 26 | | 43180 |

Tabulka 5: Porovnání nákladů na TPV pro různá množství odlitků vyráběných konvenčně a za pomocí 3D tisku

| technologie výroby odlitku | cena TPV [Kč] | počet odlitků [ks] | | | | |
|----------------------------|---------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 5 | 10 | 100 | 1 000 |
| | | cena odlitku [Kč] | | | | |
| konvenční formování | 165 000 | 181 260 | 49 180 | 32 670 | 17 811 | 16 325 |
| technologie sandprint | 9 100 | 43 180 | 42 716 | 34 990 | 34 171 | 34 089 |

Tabulka 5 ukazuje, že přibližně do 10 kusů odlitků je finančně výhodné použití technologie sandprint. Nad 10 kusů odlitků už začíná být tato technologie nevýhodná. Samozřejmě musí být brán zřetel na složitost odlitku. V některých případech se vytištěná forma volí i pro větší počty než 10 kusů, protože při odlití přesného složitého odlitku se ušetří čas i náklady při následném dokončování (obrábění atd.)

Analýza charakteristiky sortimentu strojírenských výrobků ukázala, ve kterých oblastech je možné využít výhod tvarové neomezenosti výroby dílů vyrobených technologií sandprint, pokud budou mít požadované mechanické vlastnosti.

V principu jde o to, že 3D tiskárna vytiskne tvar v podobě pískové struktury a následnou úpravou se změní mechanické vlastnosti.

Tabulka 6: Požadované vlastnosti materiálů na výrobky firmy Modelárna-Liaz

| POUŽITÍ | | VLASTNOSTI | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|------------|------|------|----------------|-------------------|------------|--------------|---------------|----------------|----------|---------------|
| | | TAH | TLAK | OHYB | NÍZKÁ DILATACE | TEPLOTNÍ ODOLNOST | PRODYŠNOST | NEPRODÝŠNOST | HLADKÝ POVRCH | NÍZKÁ HMOTNOST | KŘEHKOST | OBROBITELNOST |
| PŘÍPRAVKY | LEPENÍ | | ■ | | | | | | | ■ | | |
| | SVAŘOVÁNÍ | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| | MĚŘENÍ | | ■ | | ■ | | | | | | | |
| | LISOVÁNÍ | | ■ | | | | | | | | | |
| | DOCHLAZOVÁNÍ | | ■ | ■ | | | | | | | | |
| | LAMINOVÁNÍ | ■ | ■ | ■ | | ■ | | ■ | ■ | ■ | | ■ |
| | ODLÉVÁNÍ PLASTŮ | ■ | ■ | ■ | | | | ■ | ■ | | | ■ |
| | SVĚVÁRENSTVÍ | ■ | ■ | ■ | | | | ■ | ■ | | | |
| | KLIMAKOMORA | ■ | ■ | ■ | | | | | | ■ | | ■ |
| DÍLY/VÝROBKY | DESIGN | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | ■ |
| | AERODYNAMIKA | ■ | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | |
| | SIMULACE ARCHITEKTURY | | ■ | | | | | | | ■ | | |
| | ZÁSTAVBY | ■ | ■ | ■ | | | | | | ■ | | ■ |
| | DÍLY NÁSTROJŮ | ■ | ■ | ■ | | | | | ■ | | | ■ |
| | STOJANY | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | ■ | | | ■ |

Tabulka 6 ukazuje, v jakých oblastech je možné využít tvarové neomezenosti dílů vyrobených technologií sandprint, pokud budou mít požadované mechanické vlastnosti.

2.4.2 Práce s 3D daty

Dnes je ve strojírenství práce s 3D daty běžnou záležitostí a v období digitalizace výroby se bez ní nelze obejít. Kromě samotné konstrukce dílů, nástrojů a přípravků lze provádět na 3D modelech i simulace namáhání, odlévání, průběhu napětí, plnění formy taveninou a tuhnutí kovu ve formě. 3D model umožní i a tzv. bestfit – ideální napolohování odlitku při obrábění a výstupní kontrole rozměrů. Dále se nabízí využití v reversním inženýrství, kdy se již vyrobené fyzické díly zpětně digitalizují a vytváří se 3D model, který je možné dále softwarově modifikovat.



Bohužel ještě dnes má velké množství sléváren problém pracovat s 3D daty odlišných i forem. Společnosti investovaly do slévárenských technologií, ale příchodem sandprintu byly zaskočeny. V některých slévárnách nelze 3D data prohlížet, natož je dále zpracovávat.

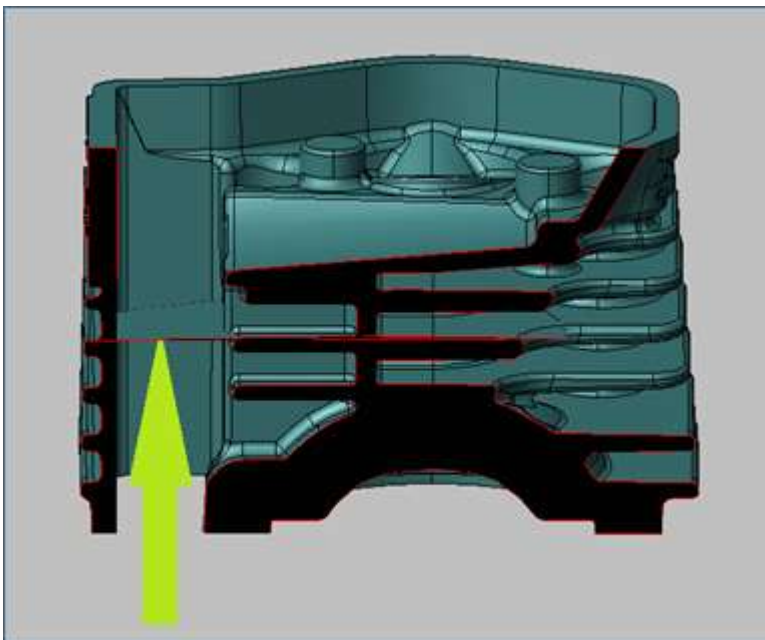
Proto je širší prosazování 3D tisku pomalejší, než se čekalo. Ve slévárnách, kde data již umějí používat, nebo využívají externí pomoc jiných konstrukčních kanceláří, občas nastávají následující komplikace a chyby:

- 1) Špatné měřítko dat – vede k vytištění forem špatných rozměrů. Jako vstupní 3D data pro tiskárnu se výhradně používá formát STL. Ale CAD software pracují i s jinými formáty STEP, IGS, CATIA, PRO/Engineer a dalšími. Generování 3D dat ve formátu STL je překladem z těchto formátů možné, ale mohou vzniknout chyby, jako je špatné měřítko generovaných dat nebo zdeformování určitých detailů formy. Je proto vždy nutné provést porovnání původních dat od konstruktéra a vygenerovaných dat ve formátu STL.
- 2) Geometrické deformace tvarů – deformace detailů 3D dat vlivem špatného formátování, transformací dat do formátu STL. Překladem 3D dat z různých formátů je složitý matematický proces. Vlivem různých verzí jednotlivých CAD software nemusí být překlad bezchybný. 3D data s neuzavřenými nebo vyčnívajícimi plochami tiskárna nedokáže přijmout. Proto je nutné vždy před tiskem 3D data formy pečlivě zkontrolovat a vyvarovat se chyb, které mohou být zjištěny až po nákladném a časově náročném vytisknutí.



Obrázek 27: Příklad chyby zaviněné špatnou prací s daty

Na obrázku 27 je kruhový tvar deformovaný při překladu do STL. Otvor má být kulatý a vznikl z něho desetiúhelník.



Obrázek 28: Druhý příklad chyby zaviněné špatnou prací s daty.

Na obrázku 28 je vidět vyčnívající plocha v modelu odlitku

2.4.3 Vtoková soustava a odvětrání formy

Vtoková soustava má několik funkcí. Hlavní funkcí je dokonalé naplnění dutiny formy roztaveným kovem. Dále potom zachycení strusky a nečistot, které se mohou v roztaveném kovu nacházet nebo vznikat. [47]

Plnicí fáze je kritickým jevem při odlévání do pískových forem. Závisí na ní kvalita odlitků. Nejnovější výzkum ukázal, že u většiny slitin určených pro odlévání je kritická rychlost tečení taveniny v rozmezí 0,4 až 0,6 m/s. [19]

Vtoková soustava je z velké části závislá na dlouholetých zkušenostech slévačů a formířů. Každá slévárna má svá vyzkoušená pravidla i postupy, a toto know-how si střeží. Vždy však jde o dodržení stejných fyzikálních zákonitostí. Výhodou digitalizace je i možnost simulace chování vtokové soustavy a odlitku. Pomocí vhodného software a při zadání správných parametrů, někdy obtížně definovatelných, lze docílit optimalizace a správné funkce vtokové soustavy.

Vtoková soustava u forem na bázi písku může být rovnotlaká, přetlaková a podtlaková.

To závisí na tom, zda funkční průřez licích kanálů směrem do dutiny formy zůstává stejný, nebo se zmenšuje, popř. zvětšuje. Vždy se jedná o lití gravitační, kdy je využíván metalostatický tlak taveniny.

Odvětrání formy má za úkol zajistit odvod vzduchu a plynů, vznikajících reakcí při styku horké taveniny a materiálu formy. Plyny je třeba odvést z dutiny formy tak, aby nebylo bráněno dokonalému odlití odlitku.

Formy vyráběné technologií 3D tisku mají však v tomto ohledu výhodu, že zde není tvarové omezení vtokové soustavy. Ta může být libovolně složitá. Vtoková soustava u tradiční pískové formy vzniká poskládáním modelů jednotlivých částí soustavy nebo je předmodelována na modelové desce nebo na modelovém zařízení. Její tvar je omezen možností odformování a vedením dělicí roviny samotného odlitku.

V případě 3D tisku může mít vtoková soustava optimální tvar se zaoblenými přechody, pozvolnými záhyby, změnami průřezů kanálů a libovolnou dělicí rovinou. Může se tak docílit optimálního rozlití kovu a naplnění formy bez turbulencí. Lze rovněž zamezit nebo minimalizovat směšování taveniny se vzduchem a následnou oxidací a vymílání písku z formy a jeho vměšování do taveniny. [33]

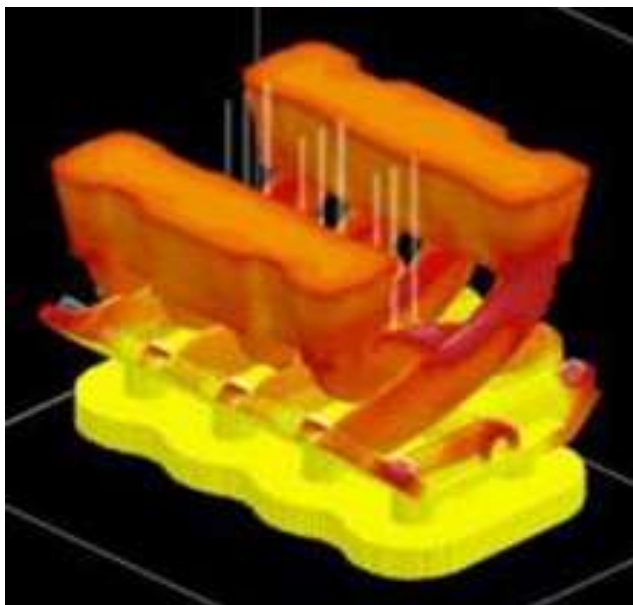


Při plnění formy taveninou se musí zohlednit i odvětrání formy prostřednictvím její vlastní prodyšnosti nebo dodatečnými odvětrávacími kanály. Velikost vtokové soustavy ovlivňuje výrazně spotřebu taveniny na odlitek, a proto její optimalizace může vést ke značným úsporám. U složitých odlitků může tvořit objem vtokové soustavy až 30 % objemu formy.

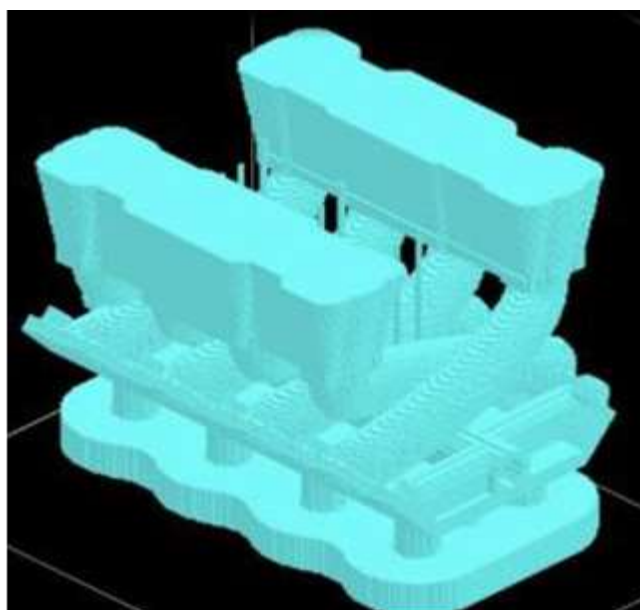
Optimalizací vtokové soustavy se zabývá také sama firma ExOne a využívá svůj simulační software. Lze pomocí něho simulovat děje, které probíhají během licího procesu a tuhnutí. [8]

Přesnost a kvalita výsledků však závisí na co nejpřesnějším zadání vstupních parametrů a podmínek do výpočtového software. Tyto vstupní údaje se v některých případech musí kvalifikovaně odhadnout a počítat s určitou chybou výpočtu či simulace. I s určitou nepřesností jsou simulace velice užitečným nástrojem pro konstrukci vlastního odlitku i licí formy.

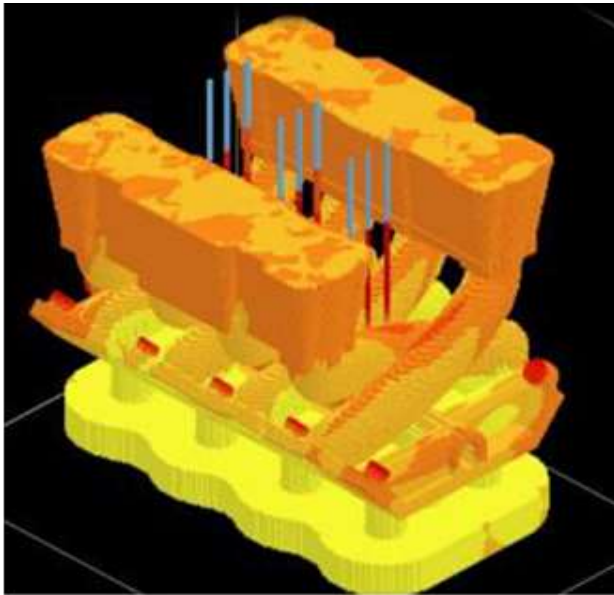
Na následujících obrázcích jsou ukázky zobrazení simulací



Obrázek 29: Analýza kapalné fáze taveniny ve formě [8]



Obrázek 30: Flow analýza ukazující rychlost plnění dutiny formy [8]



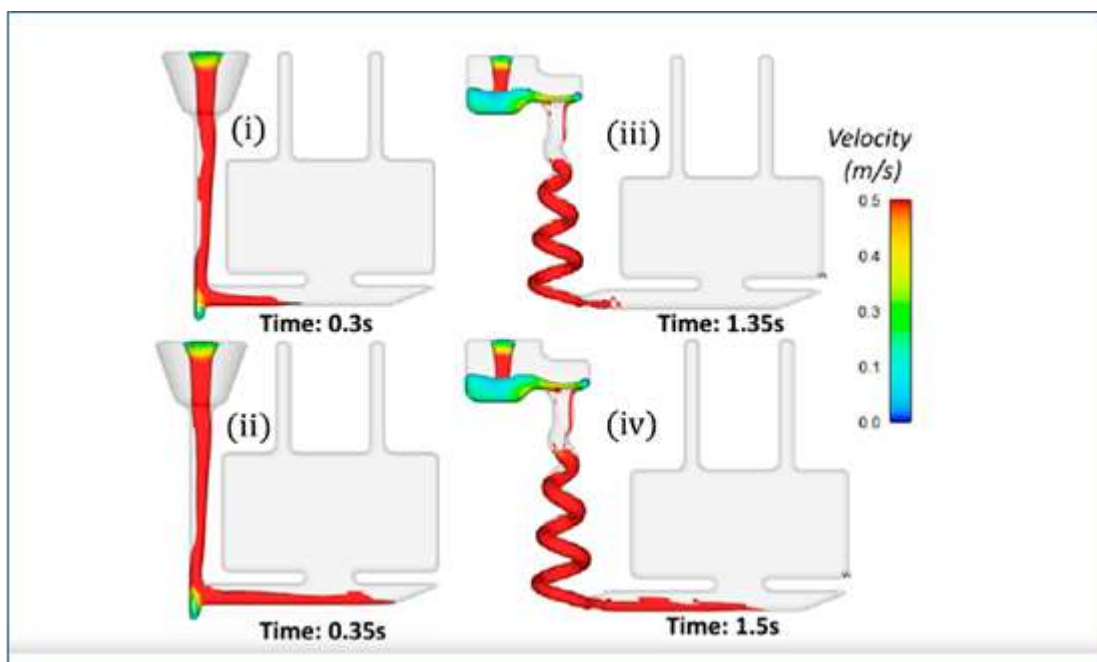
Obrázek 31: Teplotní pole odlitku [8]



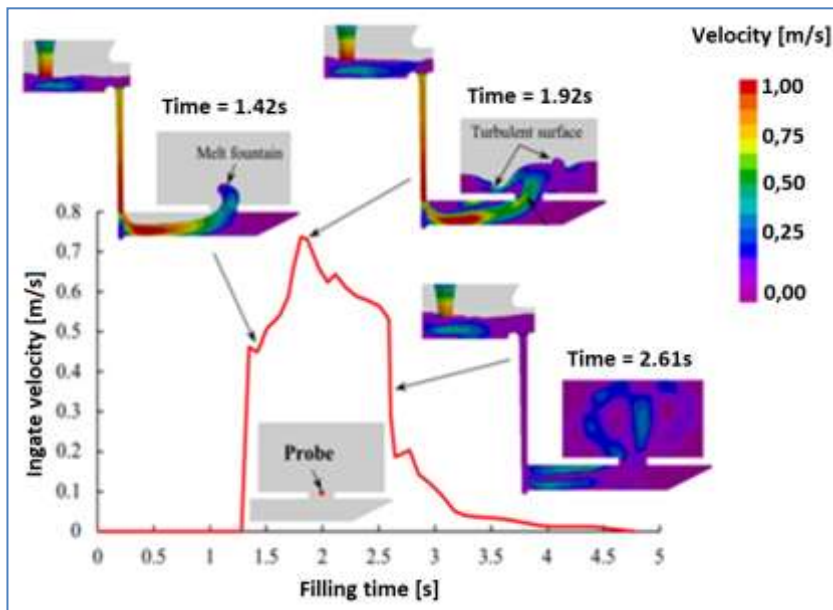
Obrázek 32: Odlitek po vytlačení z formy [8]

V další výzkumné studii autoři prezentují jinou metodu simulace a kontroly vtokové soustavy. Byly zde porovnány dva typy vtokové soustavy s rovným a spirálovým licím kanálem. Porovnání proběhlo tak, že se vytvořily dva typy fyzických forem vyrobených metodou sandprint. Do těchto forem byly nainstalovány senzory

do vtokových kanálů pro sledování rychlosti toku taveniny v reálném čase během lití kovů. Rychlost průtoku taveniny se zjišťuje pomocí oscilátoru, jehož frekvence je citlivá na změny magnetického pole a magnetického toku. Měření rychlosti tečení taveniny proběhlo pro hliníkovou slitinu s označením 319 (obsahuje 6 % Si, 3,5 % Cu a maximálně 1,0 Fe). Dále byl měřen čas, kdy doteče tavenina k jednotlivým sensorům. Ty jsou umístěny na začátku a na konci vtokového kanálu. Rychlosti toku taveniny, naměřené tímto experimentem, jsou v rozmezí 5 % hodnot z výpočetních softwarových simulací. Jednou z velkých výhod 3D tištěných forem je geometrická svoboda složitých vtokových systémů nezbytných ke snížení turbulencí. Poznatky z této studie navrhují vložení sensorů do pískových forem. Tímto se monitoruje rychlost tečení kovu za účelem ověření výsledků simulace, dále porovnání výkonu vtokových systémů a zlepšení kvality. [19]



Obrázek 33: Porovnání časů plnění formy taveninou při rovném a spirálovém vtokovém kanálu [33]



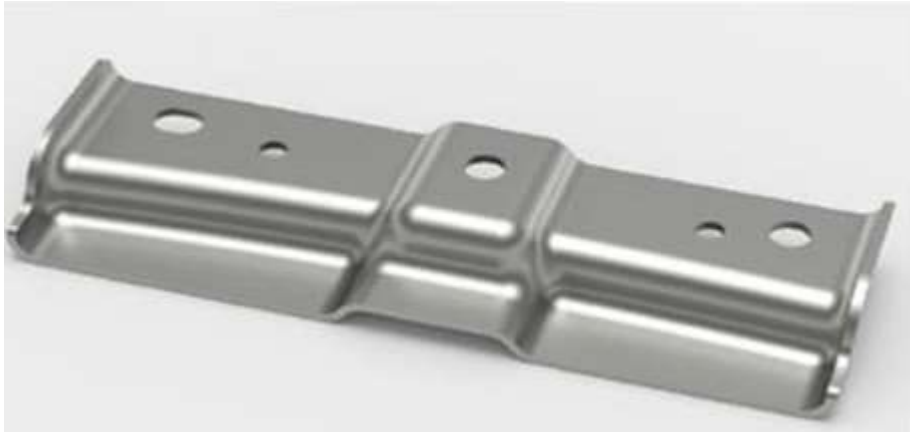
Obrázek 34: Výsledky softwarové simulace plnění formy a znázornění rychlosti vtékání a času plnění dutiny formy [33]

Při porovnání hodnot softwarové simulace a hodnot měření při skutečném lítí se dospělo k poznání, že rozdíl výsledků je do 5 %. [33]

2.4.4 Odlévání detailů (drážek, děr, žeber)

Technologie sandprint umožňuje vyrábět složité tvary díky tomu, že je bezmodelová. Tedy není nutné řešit odformování modelu a vkládání jader. Tato technická vymoženost dovoluje vytvářet odlitky s takzvanými organickými strukturami. To znamená, že tvar odlitku je přizpůsoben jejich funkci i namáhání. Struktura je řešena podobně jako v přírodě např. kostí nebo rostlin. Organická struktura umí dokonale využít vlastnosti materiálu a geometrie pro co nejvyšší funkčnost jistého prvku. Obvykle je tvořena plochami a množstvím výztužných žeber. Je mimořádně úsporná na množství materiálu. Takto provedené odlitky vedou ke značné úspoře licího kovu (tedy i hmotnosti odlitku) a výrobních nákladů při zachování jejich funkčních vlastností.

Organickou strukturu jsou dnes schopny navrhnout CAD software po zadání parametrů odlitku a jeho namáhání. Konstruktor potom může provést ještě korekci podle vlastních zkušeností.



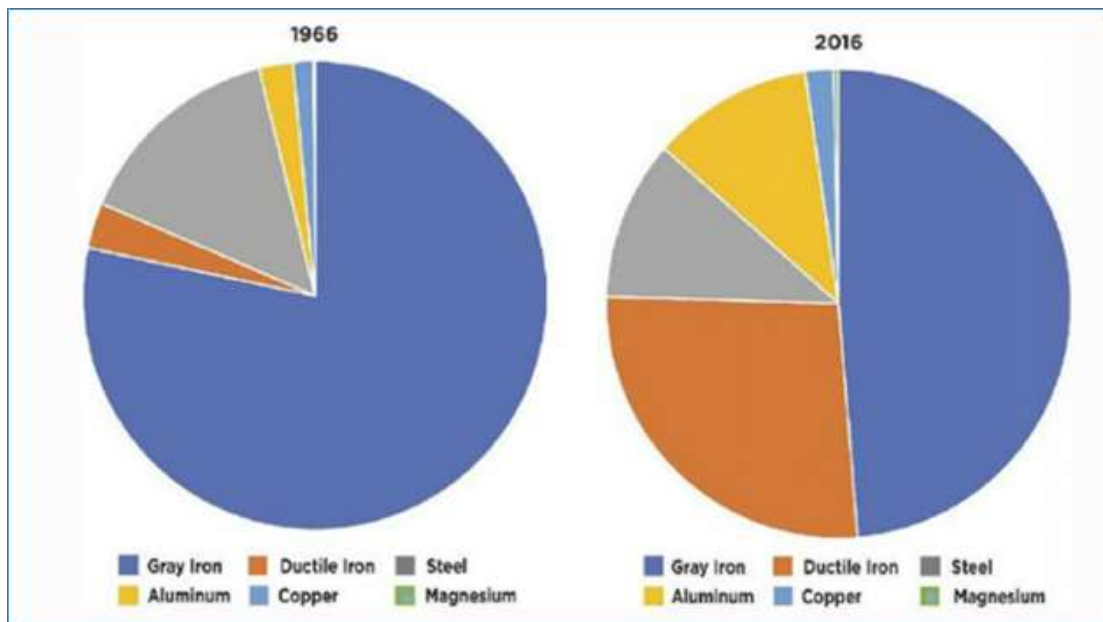
Obrázek 35: Díl vyrobený klasickou technologií lisováním z plechu [8]



Obrázek 36: Optimalizovaný díl vytvořený jako odlitek s organickou strukturou s vyšší pevností, úspora hmotnosti je 45 % [8]

Touto problematikou se zabývá ve světě několik pracovišť. Jedním z nich je samotná firma ExOne, která se zabývá náhradou tradiční výroby technologiemi 3D tisku z kovu i odlitků z forem vyrobených metodou sandprint. Hlavními parametry jsou snížení hmotnosti a úspora spotřebovaného i odpadového materiálu. Bohužel firma ExOne neposkytuje veřejně k dispozici výsledky výzkumu návrhů pískových forem a využití limitních vlastností technologie sandprint.

Publikace v odborném časopise International Journal of Metalcasting dokumentuje změnu situace ve slévárenství, kdy za posledních 60 let se změnil poměr kovů používaných ve slévárenství. Množství šedé litiny se snížilo o 50 % a naopak množství hliníkových slitin se zvýšilo více než 6x a množství tvárné litiny dokonce více než 7x.



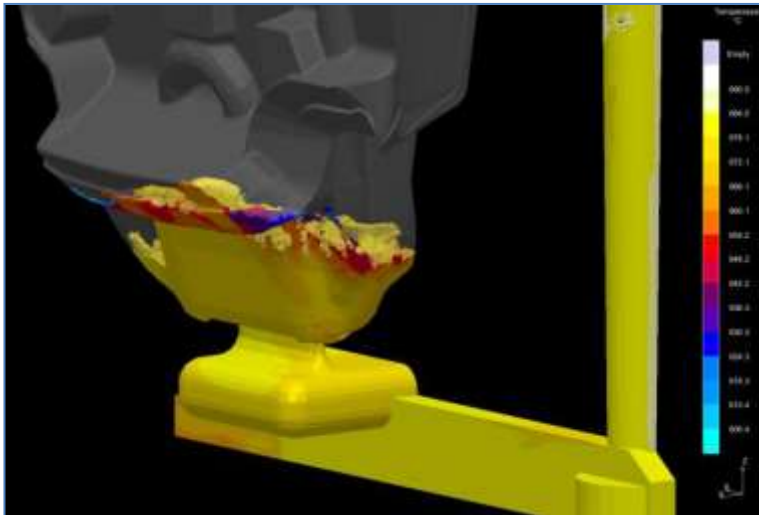
Obrázek 37: Poměr zastoupení kovů ve slévárenství [34]

Dále článek pojednává o návrzích a optimalizaci tenkostěnného lití s případovými studii, o modelování procesu lití, o změnách stávajících odlitků na nové lehčí materiály apod. [37]

2.4.5 Simulace lícího procesu

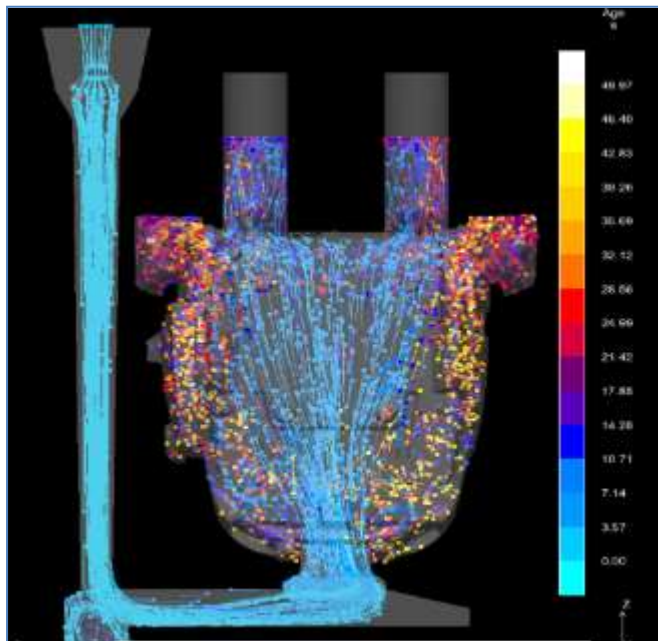
Lící proces je složitá záležitost, na které většinou závisí kvalita odlitku. Dříve byl návrh formy a všech jejích prvků záležitostí slévárenských odborníků a jejich mnohaletých zkušeností. Slévárenství je jedna z nejstarších technologií zpracování kovu, která se vyvíjela po několik staletí. Existuje velké množství literatury a vznikla řada norem. Teprve se vznikem digitalizace dat, CAD konstrukce a simulačních software je možné provést a popsat chování taveniny ve formě. Technologie sandprint potom umožnila vytisknout pískovou formu přesně podle optimálního návrhu bez zásadních omezení.

Pokud se do simulačního software zadají relevantní parametry, výsledek odpovídá realitě. Výhodou digitalizace a simulací je, že se forma optimalizuje ještě před její samotnou výrobou a neplýtvá se materiálem formy, kovem ani energiemi.



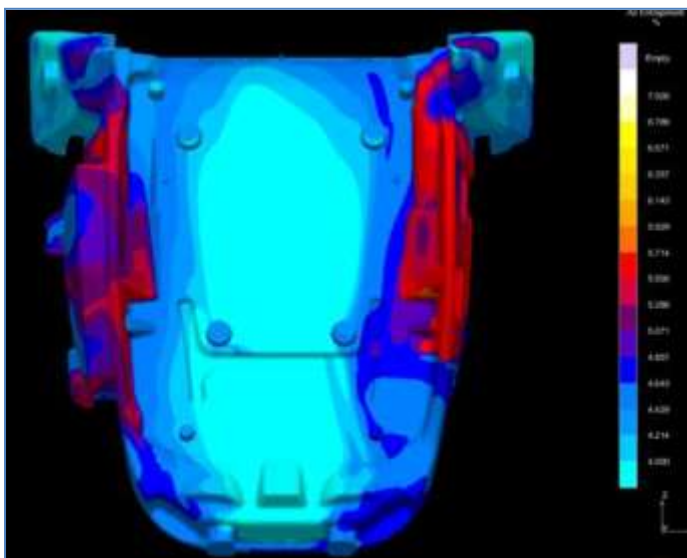
Obrázek 38: Simulace plnění formy v počáteční fázi

Obrázek 38 ukazuje softwarovou simulaci chování taveniny během jejího vtékání do dutiny formy. Tato fáze odlévání je velice důležitá pro kvalitu odlitku. Rozvířená hladina taveniny může vést k zanesení oxidických plen do objemu odlitku.



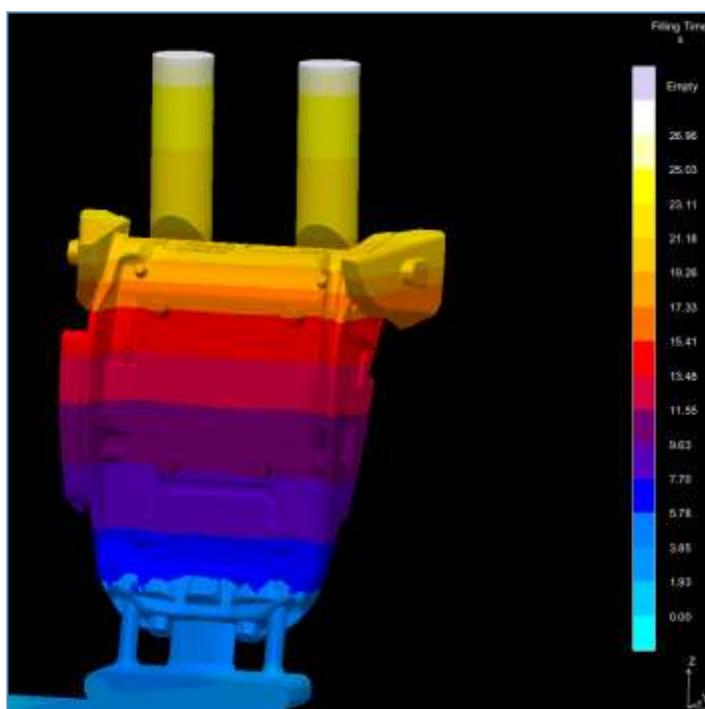
Obrázek 39: Simulace podpovrchového proudění taveniny

Obrázek 39 ukazuje softwarovou simulaci podpovrchového proudění taveniny. Zde ukazuje rovnoměrné rozložení a potvrzuje správně navrženou vtokovou soustavu.



Obrázek 40: Simulace rozložení zahlceného vzduchu v tavenině

Obrázek 40 ukazuje softwarovou simulaci rozložení zahlceného vzduchu v objemu odlitku, který způsobí porozitu.



Obrázek 41: Predikce času plnění dutiny formy

Obrázek 41 ukazuje softwarovou simulaci času plnění dutiny formy. Tato informace je důležitá pro dosažení optimálního rozložení teploty taveniny v celém objemu dutiny formy. Teplota by se neměla dostat pod teplotu likvidu – začátku tuhnutí taveniny.

2.4.6 Konstrukce a rozměry formy

Konstrukce slévárenské formy má vliv nejen na její správnou funkci. Současně ale i na spotřebu licího kovu, spotřebu písku a pojiv – materiálů na výrobu formy. Ovlivňuje dobu a rychlost tuhnutí taveniny a tím i strukturu odlitku. Dále konstrukce formy musí umožnit bezpečnou manipulaci a bezpečný proces lití. Během manipulace a odlití nesmí dojít k poškození nebo rozpadnutí formy, aby nebyl znehodnocen odlitek a nedošlo ke zranění pracovníků slévárny.

Konstrukce musí být přizpůsobena možnostem každé slévárny týkajících se především manipulace, způsobu zajištění formy a samotného procesu odlévání. Pokud je forma transportována na delší vzdálenost, musí se zohlednit její odolnost a bezpečnost při transportu.

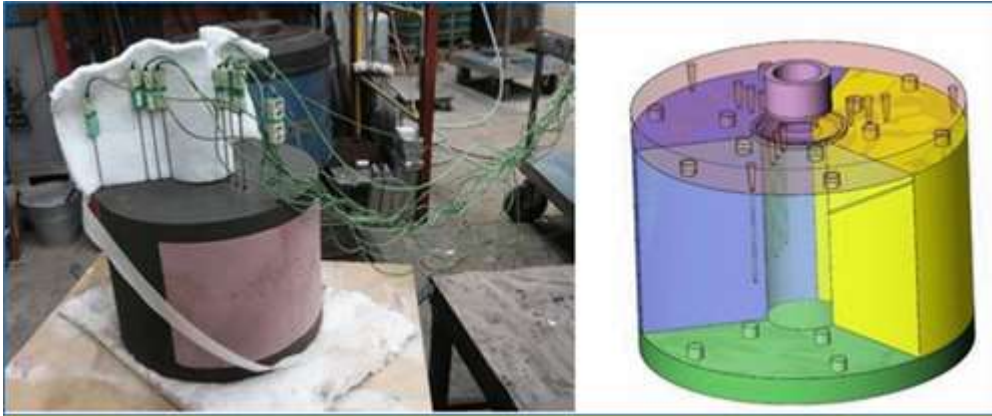
Konstrukci formy je nutné posuzovat z několika hledisek. Hlavní je tepelná vodivost a pevnost tištěné pískové struktury.

Dále je možné formu na vhodných místech odlehčit, opatřit ji manipulačními otvory i výstupky a centrovacími čepy sloužícími k co nejpřesnějšímu sestavení dílů formy atd.

Vhodné odlehčení formy redukuje množství materiálu spotřebovaného pro tisk formy, usnadňuje transport do slévárny a manipulaci při skládání formy.

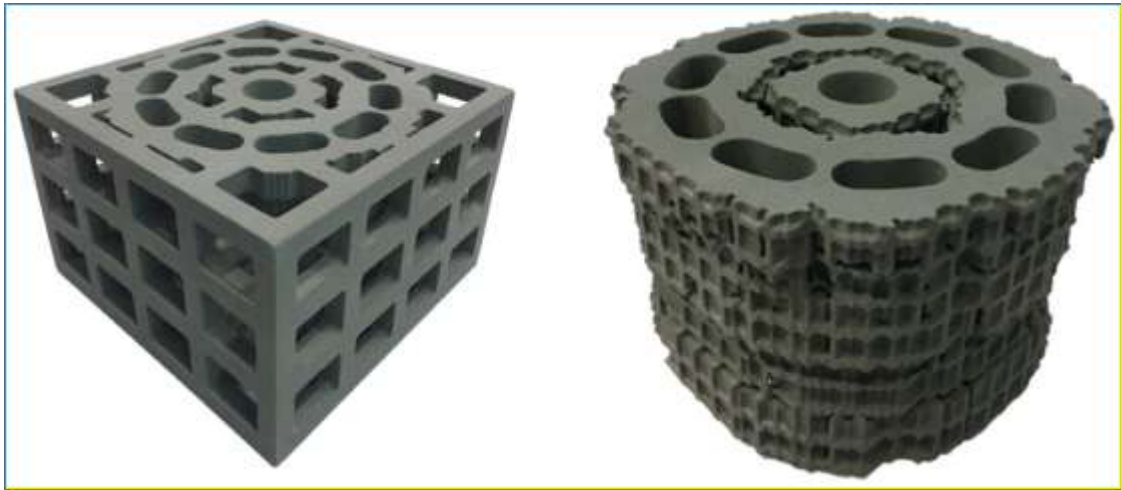
Touto problematikou se zabývají následující vědecké publikace

- 1) Zdroj 32 se zabývá tepelnými vlastnostmi formy. Byla vyrobena forma ve tvaru válce složeného ze tří kruhových výsečí a každá výseč byla z jiného typu tištěné pískové struktury s různými pojivy. Po nalití kovové taveniny do dutiny formy byly pomocí termočlánků měřeny teploty v závislosti na čase. Z naměřených hodnot byla potom vypočtena hodnota tepelné vodivosti a tepelné kapacity jednotlivých částí formy. [32]



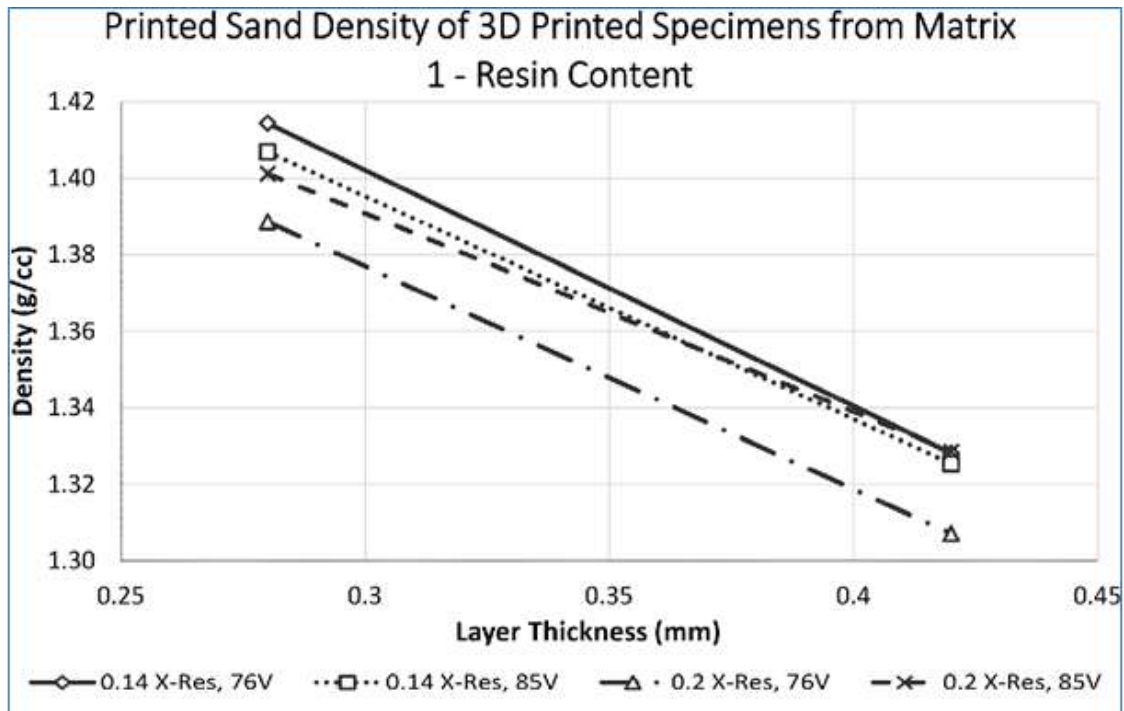
Obrázek 42: Složená forma s termočláanky a 3D model zkušební formy [32]

- 2) Přínosem zdroje 23 je výzkum vlivu tloušťky stěny pískové formy vyrobené technologií sandprint na rychlost tuhnutí a tvorbu mikrostruktury. Zvětšení tloušťky stěny pískové formy z 5 mm na 30 mm umožní zvýšit rychlost tuhnutí o 17 - 18,6 % (v numerických a experimentálních výsledcích). To má vliv na zjemnění mikrostruktury a zvýšení tvrdosti odlitku. [23]
- 3) Zdroj 12 ukazuje možnosti změn mechanických vlastností a prodyšnosti tištěné struktury pomocí změny obsahu aktivátoru a tloušťky nanášené vrstvy písku. Dále byl vytvořen matematický model pro analýzu účinků změn parametrů. [12]
- 4) Zdroj 18 je studie, zabývající se různými možnostmi ochlazování licí formy vyrobené technologií sandprint po odlití, ukazuje a měří parametry chladnutí různého provedení konstrukce i povrchu formy pro shodný odlitek. Je zde i zkoumáno (kromě přirozeného chlazení vzduchem) i chlazení vodní sprchou stříkanou na povrch formy. [18]



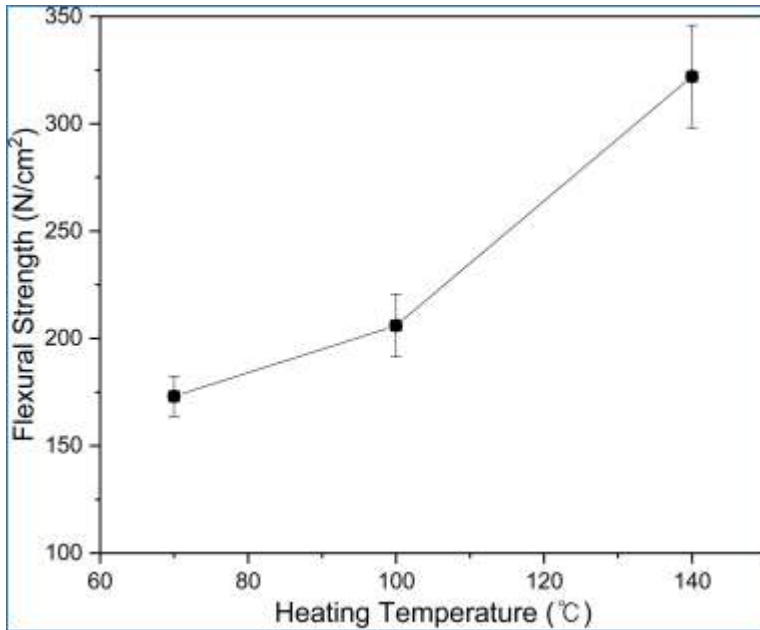
Obrázek 43: Různá provedení vytištěné formy pro shodný odlitek s různým chlazením [18]

- 5) Zdroj 30 je studie zabývající se vlivem kvality písku, obsahem nečistot, tvarem a velikostí zrn. Dále studie zkoumá úpravu písku pro 3D tisk a jeho čištění od prachových částic, které zhoršují přilnavost lepidla na zrna písku. Studie současně popisuje chemické složení písku, jeho kompatibilitnost s pojivovými systémy aktivovanými kyselinou a odolnost písku vůči vysokým teplotám.
- Dále je řešen optimální poměr jednotlivých složek struktury – písek, binder, aktivátor a charakterizován dopad různých parametrů tisku na mechanické a tepelné vlastnosti vytištěné struktury. Studie se také zabývá poměrem hmotnosti taveniny lité do formy a hmotností pískové struktury tištěné formy. Nakonec je zde analyzován proces kvality. [30]
- 6) Zdroj 5 se zabývá ovlivňováním charakteristiky tištěné pískové struktury různým nastavením parametrů 3D tiskárny. V nastavení se mění vrstva nanášeného písku, doba stříku pojiva z tiskové hlavy a úhel rozstříku. Je zde uvedena řada závislostí a výsledků. [5]

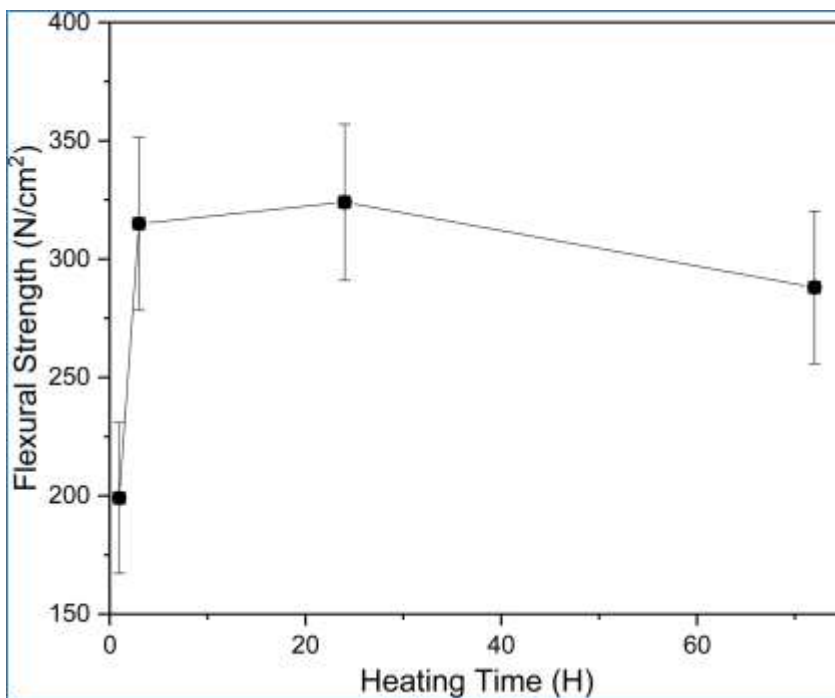


Obrázek 44: Závislost měrné hmotnosti tištěné struktury na tloušťce nanášené vrstvy písku při různém el. napětí napájení tiskové hlavy [5]

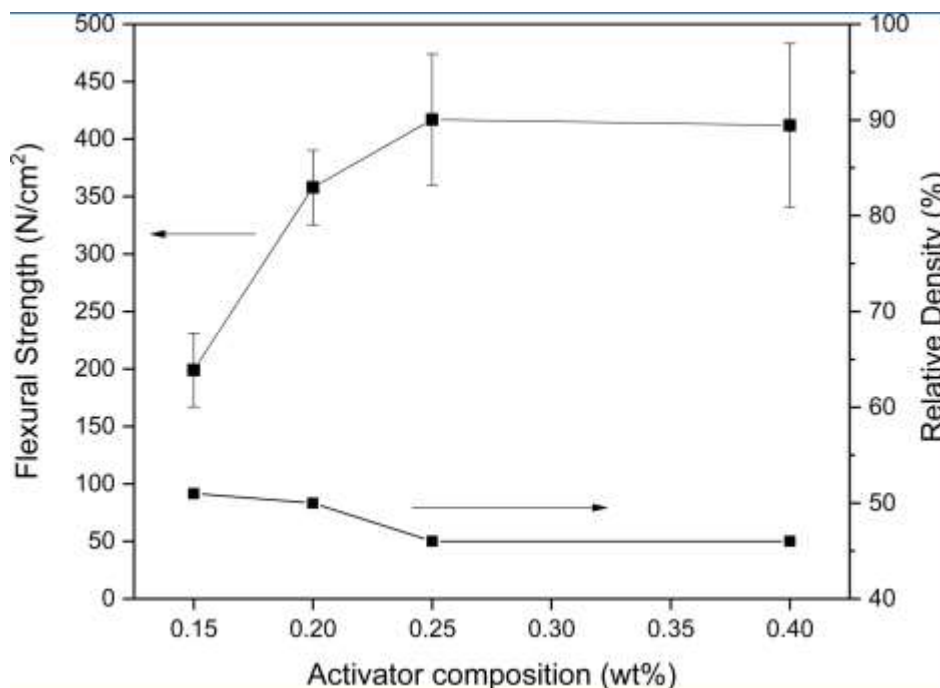
- 7) Zdroj 40 zkoumá vlastnosti tištěné pískové struktury, pórovitosti, skutečný obsah pojiva, prodyšnost a mechanické vlastnosti jako je pevnost a křehkost. Ukazuje další možné následné úpravy tištěné struktury, například působením tepla. Ukazuje, že následné tepelné zpracování při teplotě okolo 150 °C mění její mechanické i tepelné vlastnosti vlivem změn na pojivu. Výzkum ukazuje limitní meze, do jaké míry lze tištěné objekty zpevňovat pomocí jejich zahřívání. Z níže uvedených grafů (viz. obrázky 45 až 48) je vidět, že následným tepelným zpracováním tištěné struktury lze zvýšit její pevnost v ohybu až na 330 N/cm² (3,3MPa). Ale druhý graf ukazuje, že po působení teploty delším než 24 hodin se pevnost struktury opět snižuje. [40]



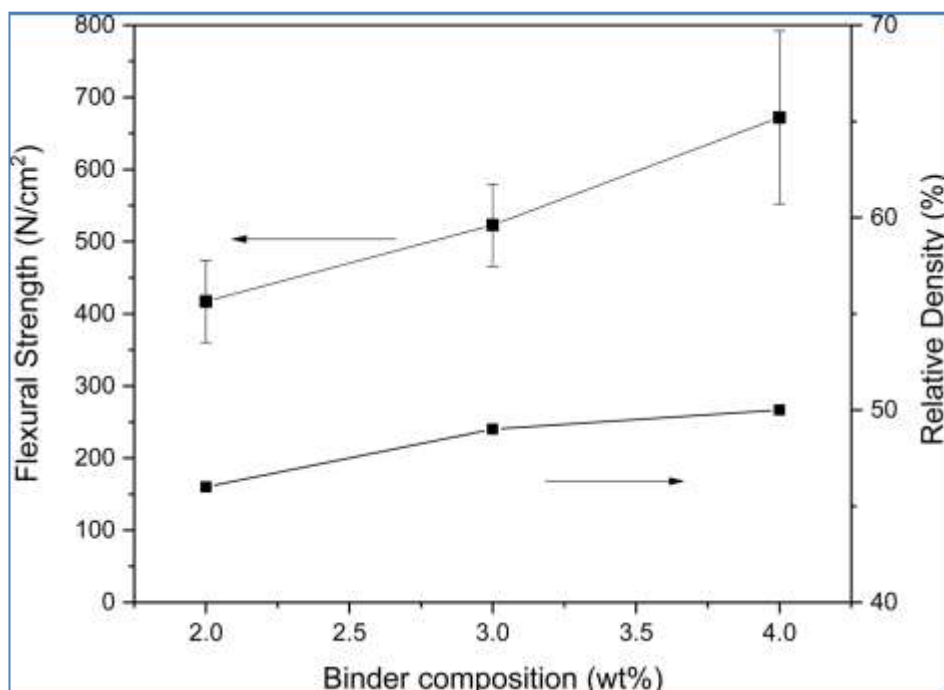
Obrázek 45: Graf závislosti pevnosti tištěné pískové struktury na teplotě [40]



Obrázek 46: Graf závislosti nárůstu pevnosti tištěné pískové struktury na čase [40]



Obrázek 47: Graf závislosti pevnosti v ohybu na obsahu aktivátoru v tištěné struktuře [40]

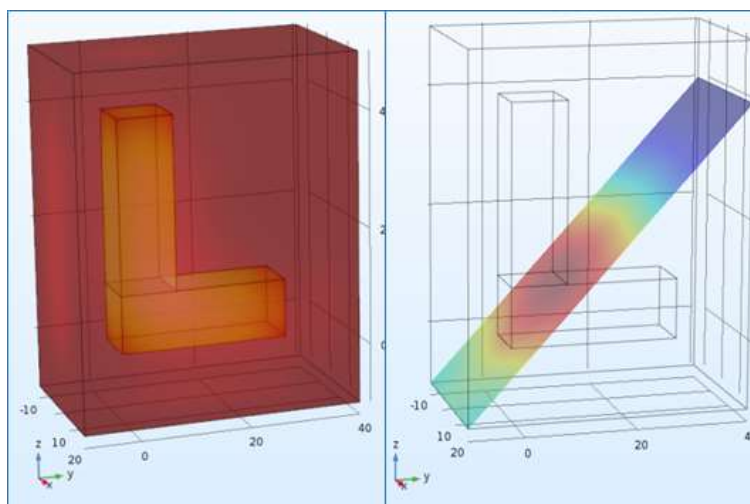


Obrázek 48: Graf závislosti pevnosti v ohybu a hustoty tištěné na obsahu binderu (pojiva) [40]

- 8) Zdroj 39 se velmi podrobně zabývá vlastnostmi tištěné pískové struktury její mikrostrukturou, pórovitostí i mechanickou pevností. Jsou zde provedeny experimenty ukazující, jak lze ovlivňovat mechanické vlastnosti změnami nastavení 3D tiskárny. Jsou zde popsány výsledky testů, při kterých se mění míscí poměry písku, pojiva a aktivátoru. Je analyzován vliv těchto změn na pevnost, prodyšnost, tvorbu plynů při zahřívání apod.

Dále se tato studie zabývá následnou tepelnou úpravou vytištěných pískových forem. Výsledkem jsou teploty, při kterých je možné zlepšit mechanické vlastnosti tištěné struktury, nebo je naopak zhoršit až k její úplné degradaci. [39]

- 9) Zdroj 67 ukazuje vliv parametrů tisku na vlastnosti formy, dále nedestruktivní metody, např. rentgenové kontroly tištěných forem. [67]
- 10) Zdroj 24 se zabývá mechanickými a tepelnými vlastnostmi pískové tištěné struktury a vlivu množství pojiva a tužidla. Dále se zde zkoumá porozita vnikáním rtuti do tištěné struktury. [24]
- 11) Zdroj 29 se zabývá vlastnostmi tištěné struktury, hlavně tepelnými, dále tepelnou vodivostí a odolností. Dále popisuje optimální konstrukci slévárenských tištěných forem a tepelné pole formy po naplnění taveninou. [29]



Obrázek 49: Tepelné pole formy v oblasti pravoúhlého vtoku [29]



- 12) Zdroj 15 se zabývá vlastnostmi tištěné struktury, závislých na množství pojiva a aktivátoru. Po úpravách mísících poměrů jsou popsány změny vlastností. Dále změny tvorby plynů vlivem styku s taveninou a schopnost je odvádět díky porozitě z formy. [15]

- 13) Zdroj 34 popisuje zavádění aditivních technologií do sléváren v USA. Představeny byly výhody technologie sandprint při odlévání turbínových krytů bez pevných formovacích modelů. [34]

3 Cíle práce

Disertační práce se zabývá technologiemi Rapid prototyping a to 3D tisku písku tzv. sandprint s hlavním využitím ve strojírenských technologiích.

Zaměření práce spočívá v objevení nových vlastností nekovových materiálů na bázi písku a jejich příprava do stavu aplikačních možností ve strojírenských technologiích.

Hlavní cíle práce:

- 1) Nalezení krajních možností vytištěné pískové struktury technologií sandprint při použití ve slévárenství
- 2) Nalezení následné úpravy struktury tištěné technologií sandprint pro zlepšení mechanických vlastností
- 3) Ověřit možnosti využití upravené tištěné struktury pro výrobu funkčních dílů a přípravků

Pro dosažení tohoto záměru práce je potřebné splnit tyto dílčí cíle:

- provést analýzu technologie sandprint a porovnat ji s konvenční výrobou slévárenských forem, porovnat je technicky i ekonomicky
- získat poznatky o možnostech a způsobech výroby slévárenských forem složitých tvarů tiskem, jak z hlediska konstrukce forem, tak i vlastností odlitků. Cílem je i nalezení limitů pro odlévání tvarových detailů
- provést analýzu tištěné pískové struktury a prozkoumat možnosti jejích úprav pro docílení jiných mechanických vlastností
- vyvinout nové kompozitní materiály na bázi písku vyztuženého pryskyřicemi pro další aplikace ve strojírenských technologiích a najít pro tento nový kompozit využití
- ověřit vlastnosti kompozitních materiálů na bázi písku vyztužených pryskyřicemi
- aplikovat výsledky experimentů pro potřeby strojírenské výroby

4 Návrh experimentů

Předmětem výzkumu bylo zjistit co nejvíce možností využití technologie sandprint, a to jak při samotném procesu v technologiích slévání, respektive odlévání složitých tvarů z kovu do tištěných pískových forem, tak při dalším využití tvarové neomezenosti tisku v dalších technologických i technických aplikacích. [11PC]

Určení optimálních parametrů při konstruování forem i dalších výrobků umožní vytisknout požadovaný předmět odolný proti tepelnému namáhání s velmi složitými tvary a detaily ve velice krátké době. Navíc s přímou vazbou datové dokumentace a tiskového stroje a se zpětnou vazbou při kontrole odlitku. [8 - 9PC, 11PC]

Následující experimenty byly navrženy, aby bylo možné lépe poznat a zmapovat vlastnosti tištěné struktury:

- 1) Odlévání složitých tvarů do forem z tištěné struktury vyrobené standardním nastavením 3D tiskárny specifikovaným od jejího výrobce. Výsledkem by mělo být stanovení limitních možností odlévání detailů.
- 2) Provedení analýzy a zkoušky skutečných parametrů tištěné struktury. Zkoušky následných úprav tištěné pískové struktury a zkoušky pro stanovení mechanických vlastností po úpravě.
- 3) Určení možnosti použití pro výrobu funkčních dílů pro strojírenství a realizovat výrobu jejich představitelů.

4.1 Odlévání složitých tvarů

Tiskárna díky svému vybavení dokáže vytisknout libovolně složitý tvar, a to v detailech i o minimální velikosti 0,4 mm. Toto je tloušťka tištěné vrstvy odpovídající dvojnásobku velikosti zrna použitého písku (zrnitost písku je 0,19 mm).

Roztavený kov – tavenina však není schopna zkopírovat jemné detaily formy a zatéct do úzkých hlubokých dutin.

Jako nejvíce problémové se pro odlévání jeví následující tvary:

- 1) žebra
- 2) drážky
- 3) výstupky
- 4) otvory

U těchto tvarů dochází obvykle k nedotečení taveniny, deformacím, prasklinám, staženinám apod.

Pro experiment byly proto navrženy 4 typy odlitků, které mají shodné základní rozměry základny 200 x 200 x 20 mm. Jedna strana základny je opatřena zkušebními tvary o různých rozměrech. K nim byly navrženy formy se třemi různými variantami vtoků, tak aby je bylo možné odlévat v různých polohách, a tak zjistit, jak se chová tekutý kov a vzniklé plyny ve formě. Licí soustava byla volena rovnotlaká, to znamená s konstantním průřezem licího kanálu.

Úmyslně byl volen tvar odlitku s nevhodnou kombinací silné stěny – základny a tenkých žebér a výstupků, aby se se případné vady co nejvíce projevíly.

Do forem byla odlévána hliníková slitina AlSi10Mg, která je běžně k dispozici ve slévárně Modelárny-Liaz. Tam je technologie jejího lití dlouhodobě používána. [36]

Tabulka 7: Chemické složení Al slitiny AlSi10Mg

| | | | | | | |
|-----------------------------------|----|--------------|----|------------|----|----------|
| material composition [wt.%] | Al | Balance | Mn | 0,45 max. | Pb | 0,15max. |
| | Si | 9,00 - 11,00 | Mg | 0,20- 0,45 | Sn | 0,05max |
| | Fe | 0,55 max. | Ni | 0,05 max. | Ti | 0,05max |
| | Cu | 0,05 max. | Zn | 0,10 max. | | |

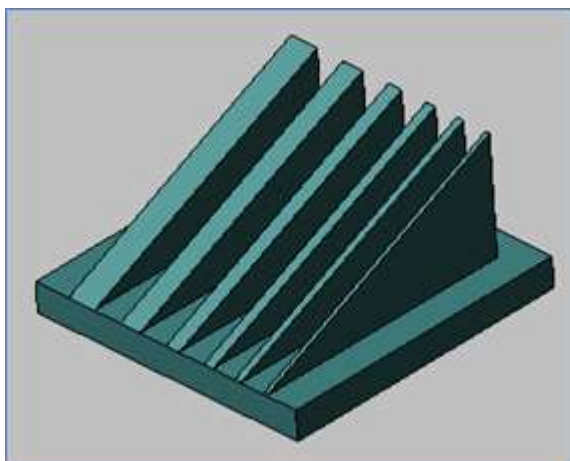
Tabulka 8: Technické parametry lití do vytištěných forem z tiskárny S-Max od firmy ExOne [7]

| | |
|-------------------------|---------------------------------|
| typ lití | gravitační |
| rozměry odlitku | 200 x 200 x 100 mm |
| slitina | AlSi10Mg, ČSN 424384 |
| teplota lití | 720° - 730 °C |
| vtok | sibralový nálipek 60 x 300 mm |
| forma | tištěný písek, 0,19 mm, furan |
| prodyšnost směsi | 180 - 300 GP resp. 300 – 500 SI |
| chladnutí | při 18 – 25°C po dobu 6 hod |

4.1.1 Lití žeber

Zkušební odlitek, respektive model, má postupně se zvyšující žebra od 0 mm do 80 mm o různých šířkách 3, 5, 7, 10, 15, 20 mm.

Hmotnost odlitku: 3,132 kg

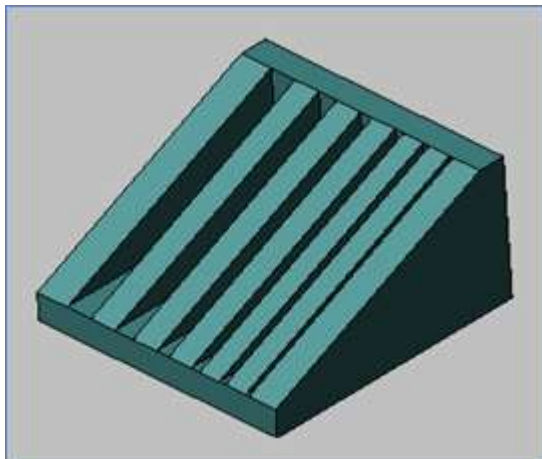


Obrázek 50: Model pro zkoušku lití žeber

4.1.2 Lití drážek

Zkušební odlitek, respektive model, má postupně se prohlubující drážky od 0 do 80 mm o různých šířkách 3, 5, 7, 10, 15, 20 mm.

Hmotnost odlitku: 5,746 kg

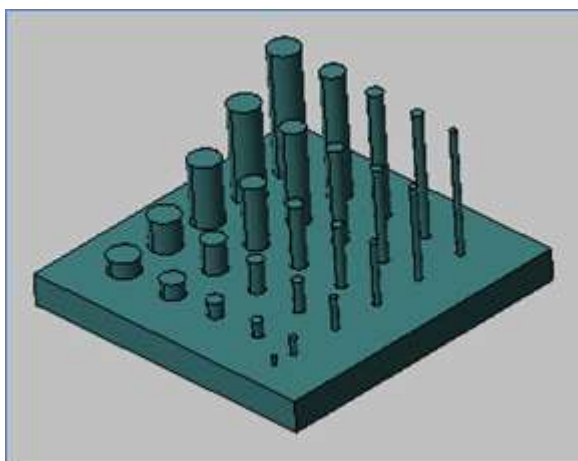


Obrázek 51: Model pro zkoušku lití drážek

4.1.3 Lití výstupků

Zkušební odlitek, respektive model, má postupně se zvyšující válcové výstupky v délkách 10, 20, 40, 60, 80 mm o různých průměrech 3, 5, 7, 10, 15, 20 mm.

Hmotnost odlitku: 2,515 kg

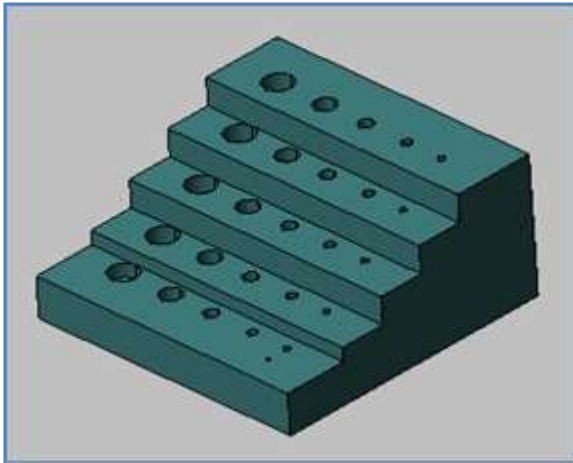


Obrázek 52: Model pro zkoušku lití výstupků

4.1.4 Lití otvorů

Zkušební odlitek, respektive model, má slepé otvory o hloubkách 10, 20, 40, 60, 80 mm a o různých průměrech 3, 5, 7, 10, 15, 20 mm.

Hmotnost odlitku: 6,637 kg



Obrázek 53: Model pro zkoušku lití otvorů

4.1.5 Polohy lití vzorků

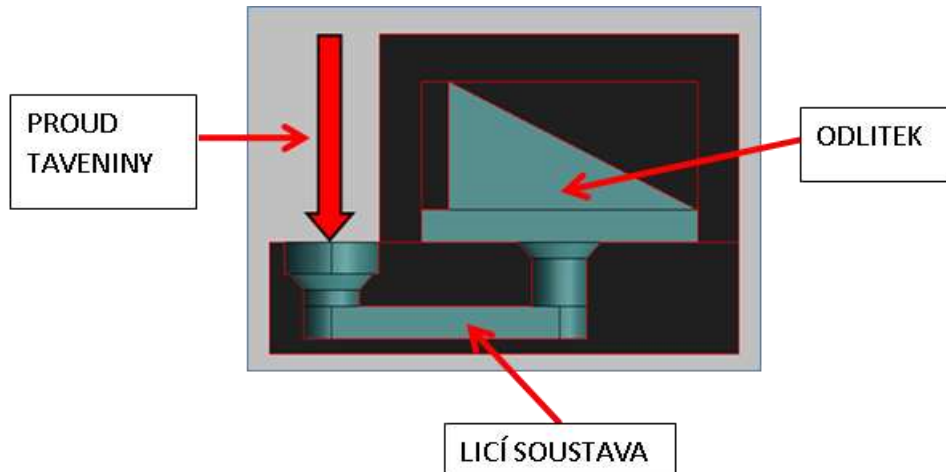
Všechny formy měly vtokový otvor na stejném místě zkušebních odlitků, a to uprostřed základny na straně naproti předlévaným prvkům. Formy nebyly úmyslně opatřeny odvodňovacími kanály, aby se zároveň otestovala prodyšnost formy a její schopnost odvést plyny z dutiny formy vzniklé při reakci pojiva a horké taveniny.

Vtoková soustava byla navržena tak, aby bylo možné odlévat ve 3 polohách. Odlitek byl ve formě umístěn jednou zkušebními detaily dolů, potom vodorovně, a nakonec detaily nahoru. Vtok byl opatřen sibalovým nálitkem, který byl vsazen do liciho kanálu formy. Sibalový náliček díky izolační schopnosti uchovává déle taveninu v tekutém stavu a usnadňuje doplňování kovu do formy během tuhnutí a smršťování odlitku.

Různé pozice odlitků ve formách i vtoků licih kanálů simulují částečně i to, že tvarově složité odlitky v praxi nelze úplně optimálně umístit do formy a vtokové kanály také nejsou vždy optimálně umístěné. Vždy se volí nejlepší kompromis.

1) Vtok zesponu a detaily nahoru

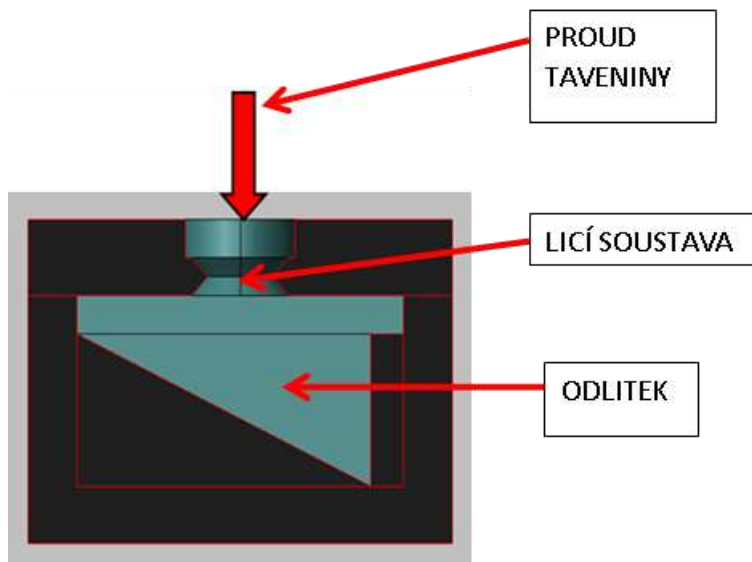
Toto je nejvhodnější poloha odlévání odlitků z hliníkových slitin. Tavenina vtéká do dutiny formy zesponu a stoupá vzhůru. Postupně vyplňuje všechny detaily formy.



Obrázek 54: Odlitek orientovaný detaily nahoru

2) Vtok z vrchu a detaily zesponu

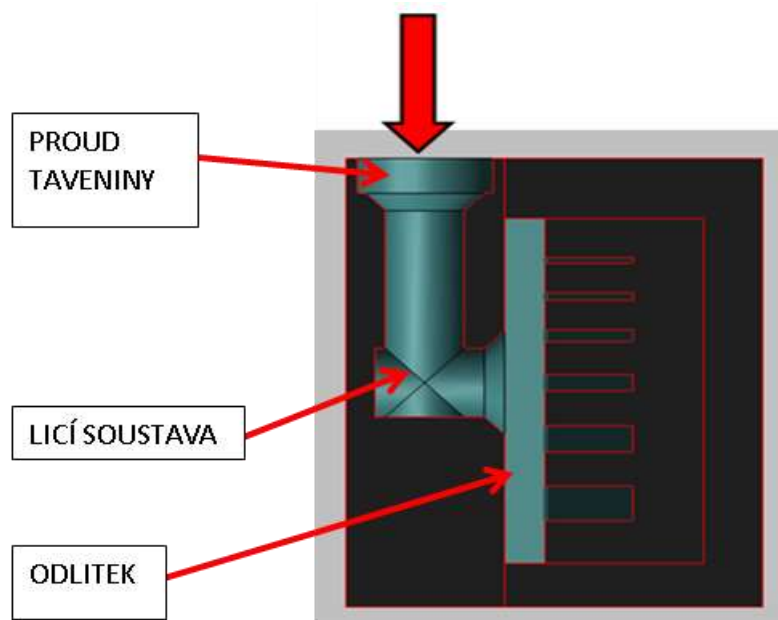
Při této poloze lití v podstatě licí soustava neplní svoji funkci uklidnění a proud taveniny teče přímo do dutiny formy. Může hrozit vymílání písku tištěné struktury formy a jeho zanesení do struktury odlitku, a tím může dojít k poškození formy i odlitku. Experiment měl ukázat i odolnost formy vyrobené technologií sandprint.



Obrázek 55: Odlitek orientovaný detaily dolů

4) Vtok z boku a detaily na druhém boku

Při této poloze tavenina postupně plní dutinu formy. Forma pro odlití žeber a drážek je natočena tak, aby tyto detaily byly vodorovně, tedy rovnoběžně s hladinou a jejich vyplnění taveninou bylo ztíženo.



Obrázek 56: Polohy lití zkušebních vzorků

4.2 Možnosti úprav tištěné struktury pro zlepšení mechanických vlastností

Výrobce 3D tiskárny, tvůrce technologie sandprint a dodavatel spotřebního materiálu firma ExOne udává pouze následující omezený přehled informací [7, 13], a to:

a) Charakteristiky spotřebního materiálu:

- písek
- pojivo
- aktivátor
- čistič

b) Mísící poměry jednotlivých složek spotřebního materiálu při tisku

c) Vlastnosti vytištěné struktury [7]

- pevnost v ohybu: 180 - 220 N/cm²
- přesnost: 0,3 mm
- teplotní odolnost: 1 500 °C
- prodyšnost: 180 – 300 GP resp. 300 – 500 SI

Navíc z důvodu servisních smluv a záručních podmínek mezi provozovatelem a výrobcem 3D tiskárny není možné nahrazovat spotřební materiál ani měnit míscí poměr složek více než povoluje výrobce. Proto se nelze vydat cestou změn těchto parametrů.

Všechny úpravy se provedou jako dodatečné na již vytištěné a vytvrzené pískové struktury.

Aby bylo možné správně nasměrovat způsob úprav, je nutné poznat její vlastnosti a zjistit možnosti dalších úprav.

Proto byl navržen následující postup:

- 1) provést analýzu charakteristiky tištěné struktury a její mechanické i chemické vlastnosti. Dále provést analýzu písku používaného pro tisk.
- 2) Připravit mechanické i teplotní zkoušky a zjistit skutečné mechanické vlastnosti tištěné struktury
- 3) Vybrat vhodná napouštědla a připravit zkušební vzorky
- 4) Provést zkoušky a popsat vlastnosti nově vyvinutých materiálů vzniklých následnými úpravami
- 5) Vyrobit funkční přípravky, strojírenské výrobky a vyzkoušet je praxi

Na základě těchto testů byly stanoveny metody zpevnění a vhodné zpevňovací materiály.

Dále byly vyrobeny zkušební vzorky a na nich provedeny mechanické zkoušky i vyhodnocení.

Z tabulky 6 je patrné, které vlastnosti tištěné pískové struktury potřebujeme znát, a které parametry potřebujeme zlepšit.

Bylo proto potřeba provést následující zkoušky a k nim připravit odpovídající zkušební vzorky. [11N]

- 1) analýzy spotřebních materiálů
- 2) analýza tištěné struktury
- 3) zkouška pevnosti v tahu
- 4) zkouška pevnosti v tlaku
- 5) zkouška pevnosti v ohybu (ohybová zkouška)
- 6) zkouška teplotní dilatace
- 7) zkouška teplotní odolnosti
- 8) zkouška nasákavosti
- 9) zkouška teplotní odolnosti
- 10) zkouška umělého povětrnostního stárnutí

Pro tyto zkoušky byly určeny tvary a rozměry zkušebních vzorků a k nim vytipovány příslušné měřicí přístroje. Všechny zkušební přístroje jsou určeny pro testování kovových vzorků a bylo předpokládáno, že budou svými parametry vyhovovat s dostatečnou rezervou. Při určování tvarů a rozměrů zkušebních vzorků bylo předpokládáno, že se docílí pevností a odolností nižší, než u hliníkových slitin nebo ocelí.

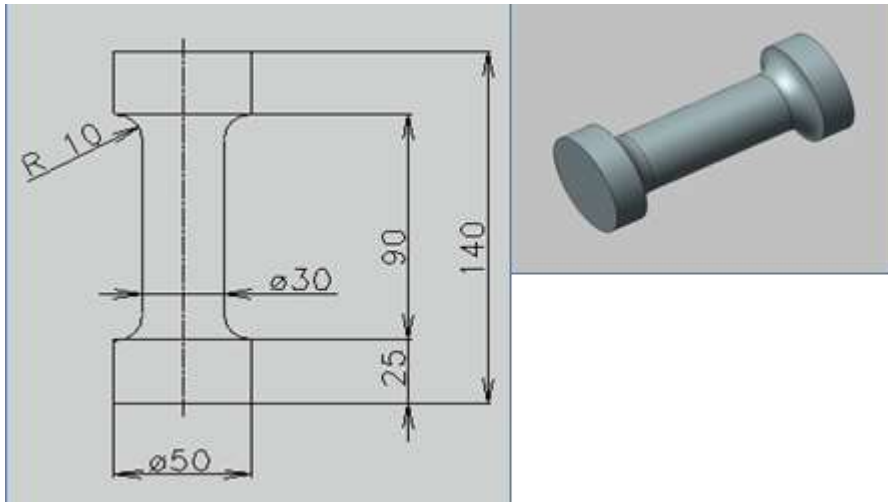
Tvar a rozměr vzorků byly navrženy tak, aby se maximálně využilo upínací a zkušební příslušenství zkušebních přístrojů.

Popis zkušebních vzorků:

- 1) Vzorek pro zkoušku pevnosti v tahu – váleček s rozšířenými konci pro upnutí do speciální kleštiny.

rozměry: $\varnothing 50 \times 120 \text{ mm}$, \varnothing krčku 30 mm

Tento tvar vzorku bude použit i pro zkoušku nasákavosti.

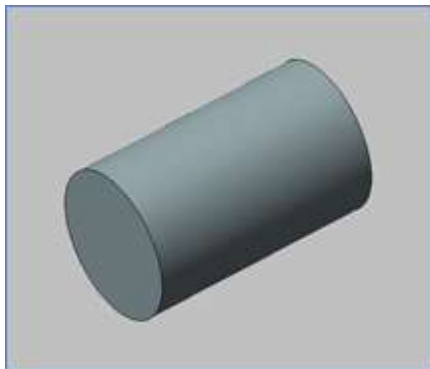


Obrázek 57: Vzorek pro zkoušku pevnosti v tahu

- 2) Vzorek pro zkoušku pevnosti v tlaku – váleček

rozměry: $\varnothing 30 \times 50 \text{ mm}$

Tento tvar vzorku bude použit i pro zkoušku vaznosti a zkoušku teplotní odolnosti

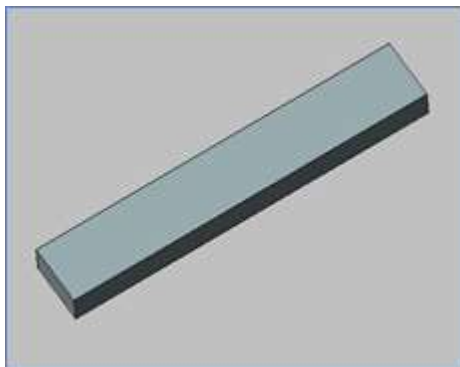


Obrázek 58: Vzorek pro zkoušku pevnosti v tlaku

3) Vzorek pro ohybovou zkoušku – tyčinka

rozměry: 10 x 40 x 220 mm

Tento tvar vzorku bude použit i pro zkoušku teplotní dilatace



Obrázek 59: Vzorek pro zkoušku pevnosti v ohybu

5 Praktická část – provedené experimenty

V této části byly provedeny experimenty a měření. Na základě výsledků experimentů bylo možné zjistit skutečné chování a vlastnosti vzorků, vyrobených technologií sandprint.

5.1 Odlévání složitých tvarů

Úkolem experimentu bylo praktické ověření možnosti odlití žeber, drážek, výstupku a předlití otvorů.

Experiment byl proveden ve slévárně firmy Modelárna – Liaz ze slitiny AlSi10Mg, která se zde denně odlévá. Slévárna je navíc vybavena odplyňovacím zařízením a kontrolním zařízením na obsah plynu v tavenině. Proto bylo předpokládáno, že slitina bude připravena v kvalitě, která nebude ovlivňovat kvalitu zkušebních odlitků.

5.1.1 Vytištění forem

Všechny testovací formy byly vytištěny na 3D tiskárně S-Max se standardním nastavením parametrů, doporučeným od výrobce.

Poloha forem při samotném tisku byla softwarově volena tak, aby jejich základna byla vodorovně, tedy rovnoběžně s rovinou nanášení jednotlivých vrstev písku.

Forem bylo vytištěno 5 sad – vždy po 5 kusech od každého typu. Tisk všech forem probíhal najednou v jednom jobboxu, aby bylo dosaženo naprosto stejné kvality tisku (nelišila se šarže písku, vlhkost a teplota okolního vzduchu apod.).

Tisk trval 10 hodin a po dokončení tisku se formy nechaly ještě 6 hodin dozrát v jobboxu, aby došlo k dokonalému zreagování pojiva s aktivátorem a pískem.

Na obrázku 60 jsou vidět formy po vyjmutí z jobboxu tiskárny a jsou na nich nalepeny zbytky nevytvrzeného písku sloužící jako podpurný materiál při tisku.

Formy po vytištění jsou bez viditelných defektů a obsahují i drobné detaily. Problematické výstupky na předlití otvorů o průměru 3 mm a délce 80 mm jsou neporušené.



Obrázek 60: Vytištěné formy se zbytky nevytvrzeného písku sloužící jako podpora

5.1.2 Čištění forem po tisku

Po tisku následovala operace čištění. Při odstraňování nevyztuženého písku pomocí štětců, vysavače a stlačeného vzduchu. I když bylo postupováno velice opatrně a pečlivě, docházelo k poškození detailů formy, které měly průměr nebo tloušťku stěny menší než 5 mm. Dále se obtížně čistila místa ve šterbinách užších než 3 mm. Při běžném slévárenském procesu by se tyto detaily musely vyloučit, jinak by docházelo k poškození forem.



Obrázek 61: Problematické detaily forem, poškození při čištění od písku, špatně přístupná místa

5.1.3 Lití vzorků

Povrch forem před odlitím nebyl nijak mechanicky upraven ani ošetřen ochranným nátěrem.

Všechny testovací formy byly odlity běžným způsobem gravitačním litím. Proti otevření formy byly jejich jednotlivé díly slepeny slévárenským lepidlem Klebepaste SB od firmy Hüttenes- Albertus.

Pro odlévání vzorků byla použita hliníková slitina AlSi10Mg, jejíž chemické složení je popsáno v tabulce 7. Parametry lití jsou popsány v tabulce 8.

Teplota taveniny při lití byla 730 °C.

Do vtokového otvoru forem byly vsazeny běžné sibalové nálitky. Tyto nálitky jsou standardní nakupované díly, vyrobené z keramických vláken a mající vysokou teplotní odolnost i izolační schopnost. Tavenina se v nich neochlazuje a zůstává tekutá pro dosazování taveniny do odlitku vlivem smrštění.



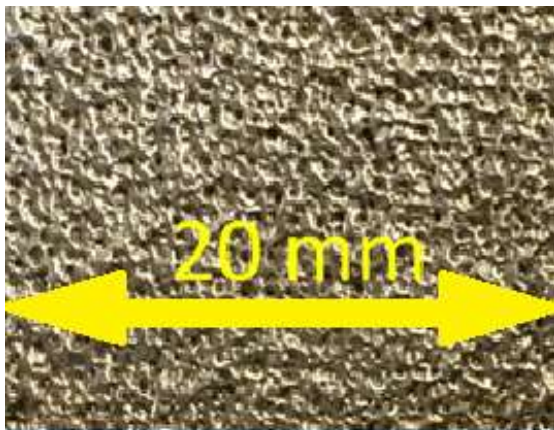
Obrázek 62: Lepidlo Klebepaste SB od firmy Hüttenes- Albertus



Obrázek 63: Testovací formy po odlití

Po odlití byly formy ponechány 6 hodin při okolní teplotě 20 °C, aby došlo k pomalému vychladnutí ve formě. Potom následovalo ruční rozbití forem pomocí palice a omytí odlitků tlakovou vodou při tlaku 100 barů. Tím se odlitky zbavily zbytků materiálu formy.

Povrch odlitků dokonale zkopíroval povrch tištěné struktury. Drsnost a struktura povrchu je vidět na obrázku 64. Po porovnání s etalony drsnosti povrchu byla určena drsnost Ra 6,3 μm.



Obrázek 64: Ukázka povrchu odlitku, který velmi dobře kopíruje tištěnou strukturu pískové formy

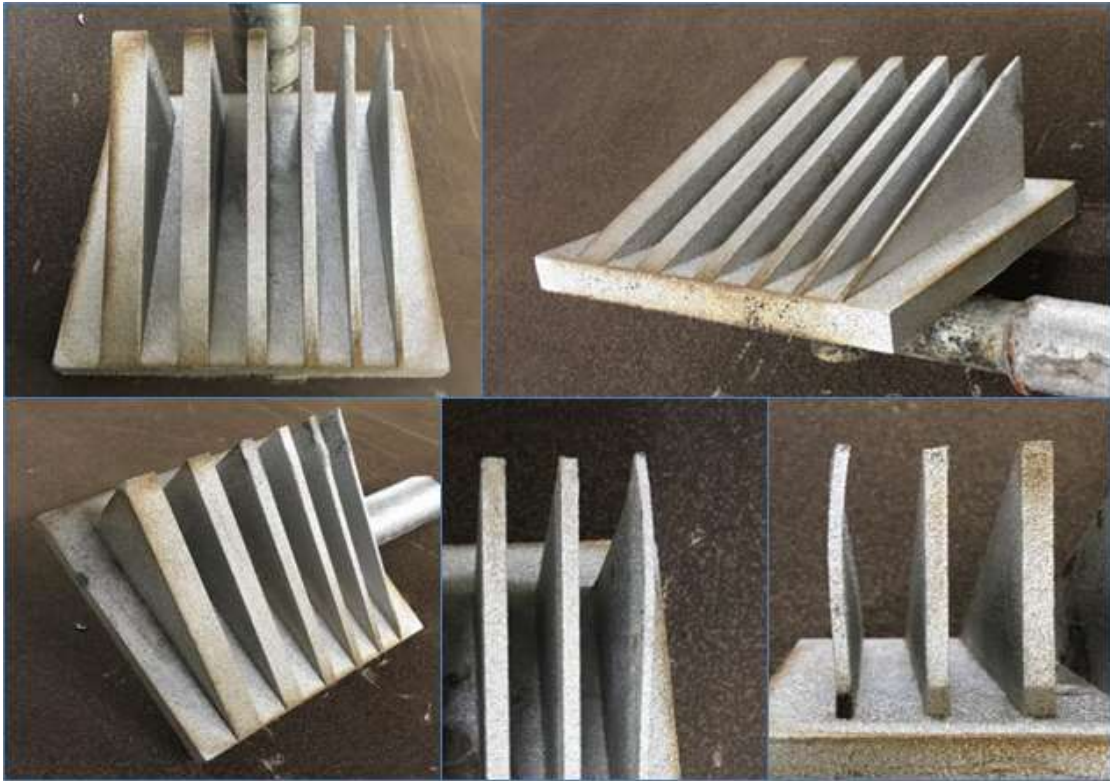
5.1.4 Výsledky lití

Po odlití a očištění byly všechny testovací odlitky podrobeny vizuální kontrole a kontrole rozměrů. Záměrně nebyly odřezány části vtokové soustavy, aby mohl být každý odlitek posouzen komplexně.

Výsledky ukázaly, že rozměrově odlitky vyhovují normě EN ISO 8062-3 [10N]. Co se týká tvaru, došlo k drobným deformacím.

Výsledky zkoušek jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

5.1.4.1 Odlévání žeber



Obrázek 65: Odlitky vzorků s žebry

Vyhodnocení:

- + všechna žebra ve všech polohách zaběhla (tavenina zatekla do celého tvaru)
- drážka pro 3 mm žebro se ve formě obtížně čistí a kontroluje nad hloubku 30 mm
- žebro tl. 3 mm se zkroutilo vlivem teploty od vedlejšího silnějšího žebra

5.1.4.2 Odlévání drážek



Obrázek 66: Odlitky vzorků s drážkami

Vyhodnocení:

- + všechny drážky byly odlity a během lití nedošlo k odlomení 3 mm tlustého žebra formy
- žebro pro 3 mm drážku se ve formě obtížně čistí a u několika forem došlo k jeho ulomení
- na žebrech formy vznikly praskliny a ve drážkách jsou odlité blány

5.1.4.3 Odlévání výstupků

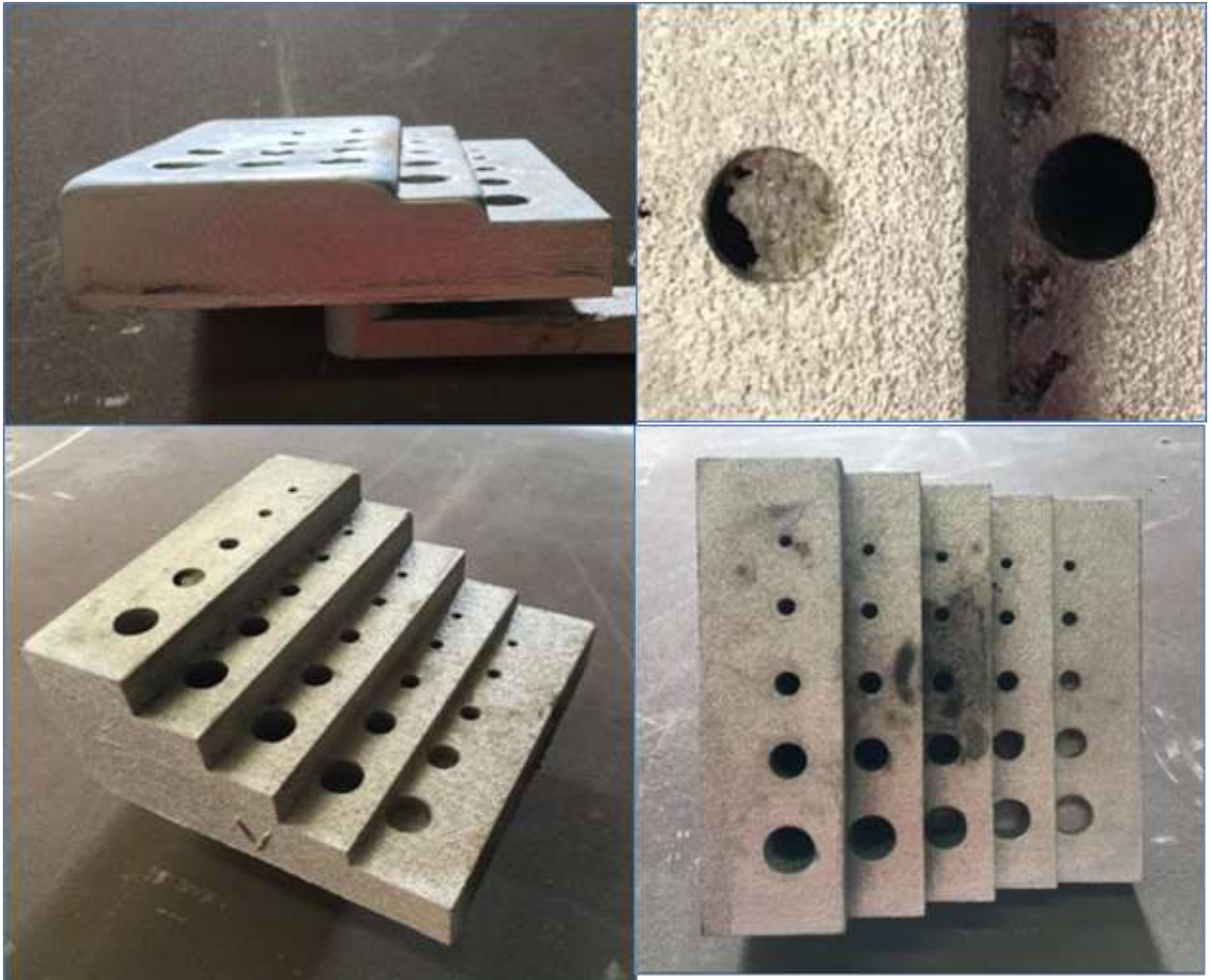


Obrázek 67: Odlitky vzorků s výstupky

Vyhodnocení:

- + lze odlít výstupky $\varnothing 3$ mm do délky 80 mm
- výstupek $\varnothing 3$ mm se vlivem chladnutí ohnul o 6 mm
- při lití zespodu se výstupky $\varnothing 10$, 15 a 20 mm odlily pouze do výšky 50–60 mm
- forma nebyla schopná propustit plyny

5.1.4.4 Odlévání otvorů



Obrázek 68: Odlitky vzorků s otvory

Vyhodnocení:

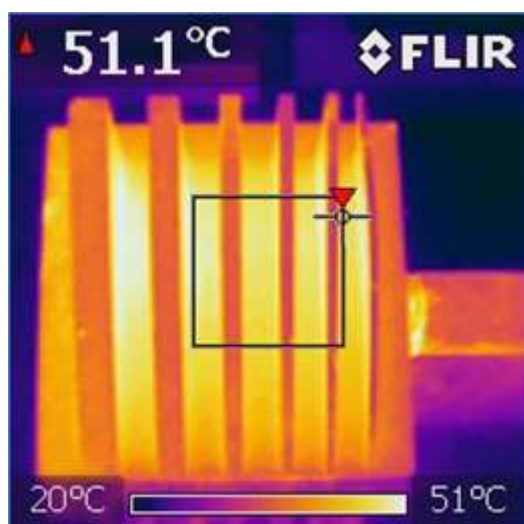
- + lze odlít otvory i \varnothing 3 mm až o hloubce 80 mm
- výstupky \varnothing 3 mm ve formách byl problém vyčistit a došlo několikrát k jeho ulomení
- při lití zespodu forma nebyla schopná propustit plyny – odlitek byl odlit pouze do výšky 30 mm od základny.

5.1.4.5 Chladnutí odlitků

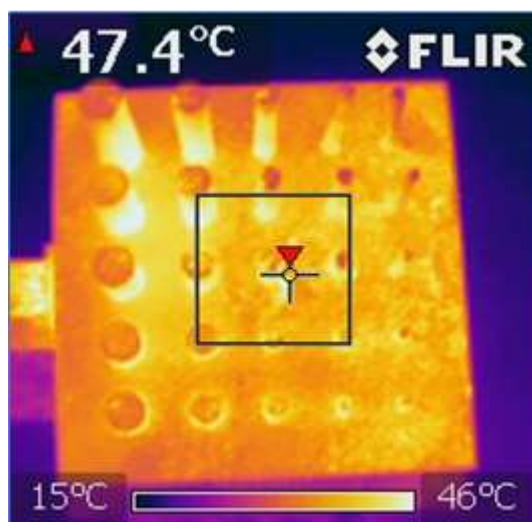
Pro demonstraci chladnutí bylo proměřeno teplotní pole dvou čerstvě odformovaných (vytlučených) odlitků. Tyto odlitky byly odlity navíc k předchozím zkouškám lití. Odlitky byly vytlučeny z formy po 30 minutách po odlití, kdy už byl kov ztuhlý. Snímání teplot bylo provedeno termokamerou FLIR E8 nastavenou na automatický režim. Měření proběhlo ve vzdálenosti 1 m.

Pro porovnání měření byla teplota ještě změřena dotykovým teploměrem Testo 905-T s rozsahem - 50 °C až + 350 °C. Přesnost teploměru byla 1 °C. Měřilo se na nejteplejším místě, což byla základna odlitku.

Teplota prvního odlitku byla 46 °C a teplota druhého 51 °C.



Obrázek 69: První foto z termokamery – teplotní pole odlitků



Obrázek 70: Druhé foto z termokamery – teplotní pole odlitků

Tato zkouška je spíše informativní a ukazuje, jak tenká žebra chladnou rychleji a základna zůstává nejdelší dobu teplá. Chladnutí odlitku na vzduchu není úplně stejné jako ve formě, ale teplotní pole je podobné.

5.1.4.6 Smrštění

Při návrhu forem byla uvažována hodnota smrštění 1 %, které se běžně užívá u konvenčních pískových forem při lití hliníkových slitin. Údaj je teoretický a není přesný [36]. Výhodou technologie 3D tisku a použití tištěných forem je, že je možné dodatečně podle prvního odlitku přesně spočítat skutečné smrštění, a to ve všech osách **x**, **y**, **z**. To lze potom následně jednoduše aplikovat pro ostatní formy.

Rozměry u všech zkušebních odlitků byly změřeny a byla spočtena průměrná hodnota smrštění 0,8 % ve všech osách. Lze tedy říct, že s dostatečnou přesností při návrhu i výrobě formy 3D tiskem můžeme použít pro všechny osy hodnotu smrštění 0,8 %.

5.2 Možnosti úprav tištěné pískové struktury pro docílení jiných mechanických vlastností

Úkolem této části bylo zanalyzovat skutečné vlastnosti jak vstupních surovin pro 3D tisk písku, tak i prozkoumat a prakticky vyzkoušet úpravy tištěné pískové struktury. Po provedení úprav zjistit, změřit a popsat nově nabyté parametry a porovnat je s běžně ve strojírenské praxi používanými materiály.

5.2.1 Analýzy spotřebních materiálů

Pro dosažení správných výsledků bylo nejprve nutné zjistit dostupné informace o vstupních materiálech a dále provést analýzu jejich skutečných vlastností. Tomuto úkolu se věnují následující kapitoly a pomocí různých metod jsou zde naměřeny potřebné parametry.

5.2.1.1 Mísící poměry písku, pojiva a tužidla

Materiál pro technologii sandprint se skládá z písku, pojiva a aktivátoru. V případě tiskárny S-Max od firmy ExOne je doporučené dávkování pro jeden plný jobbox s využitím 50 % objemu tištěných dílů následující:

| | |
|-------------|-----------------|
| Písek FS003 | 1 350 kg |
| Pojivo | 14 – 18 litrů |
| Aktivátor | 2,2 – 2,6 litru |

V bezpečnostních listech od firmy ExOne je uvedena střední hustota pojiva 1,15 kg/l a střední hustota aktivátoru 1,25 kg. Po přepočtu objemových jednotek na hmotnostní jednotky je doporučené dávkování následující:

| | |
|-------------|----------------|
| Písek FS003 | 1 350 kg |
| Pojivo | 16,1 – 20,7 kg |
| Aktivátor | 2,75 – 3,25 kg |

V následující tabulce 9 jsou uvedeny střední hodnoty doporučeného dávkování pojiva a aktivátoru na dávku písku. Přepočet je uveden na hmotnostní procenta z celkového složení a dále v dalším sloupci vztažené na 100 hmotnostních dílů písku.

Tabulka 9: Hodnoty doporučeného dávkování pojiva a aktivátoru

| složka směsi | doporučení výrobce [kg] | doporučení výrobce [%] |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| písek | 1 350 | 98,439 |
| pojivo | 18,4 | 1,342 |
| aktivátor | 3 | 0,219 |
| celkem | 1 371,4 | 100 |

5.2.1.2 Chemická analýza písku

Chemická analýza písku byla provedena metodou RXF, což je rentgenová spektrální (fluorescenční) analýza.

Jako měřicí zařízení byl použit přístroj Spektrometr PW1404 od firmy Philips, vybavený analytickým programem UniQuant umožňující semikvantitativní stanovení obsahu 74 prvků (od fluoru po uran) s udávanou nejistotou měření 5 - 10 %.



Obrázek 71: Spektrometr Philips PW1404

Tabulka 10: Výsledky chemické analýzy písku FS 003

| složka | písek FS 003 [% hmotnosti] | metoda |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Al ₂ O ₃ | 0,76 | RXF |
| MgO | <0,01 | RXF |
| SiO ₂ | 98,1 | RXF |
| Na ₂ O | <0,01 | RXF |
| P ₂ O ₅ | <0,01 | RXF |
| K ₂ O | <0,01 | RXF |
| TiO ₂ | 0,14 | RXF |
| Fe ₂ O ₃ | 0,11 | RXF |
| CaO | <0,01 | RXF |
| sušina | 99,9 | gravimetrie |

Z výsledku analýzy je patrné, že 98,1 % písku tvoří SiO₂.

5.2.1.3 Difrakční fázová analýza písku

Pomocí difrakční fázové analýzy se zjišťuje, v jaké fázi je hlavní složka písku SiO₂, která tvoří 98,1 % hmotnosti.

Jako měřící zařízení byl použit přístroj Difraktometr MPD 1880 od firmy Philips (krystalový monochromátor). Vyhodnocení bylo provedeno pomocí software X'Pert. K vyhodnocení byla použita databáze ICDDPDF2, obsahující 107 000 standardů.

5.2.1.4 Morfologie písku

Analýza se zabývá složením písku, co se týká velikosti a tvaru zrn, jejich poměrů. Byla použita metoda laserové difrakce (LD) založena na principu rozptylu laserového paprsku.

Jako měřící zařízení byl použit přístroj Masterziser 2000 od výrobce Malvern z USA.

Pro pořízení makrosnímků bylo použito zařízení Bino lupa Bresser Advance ICD 10 x – 160 x.

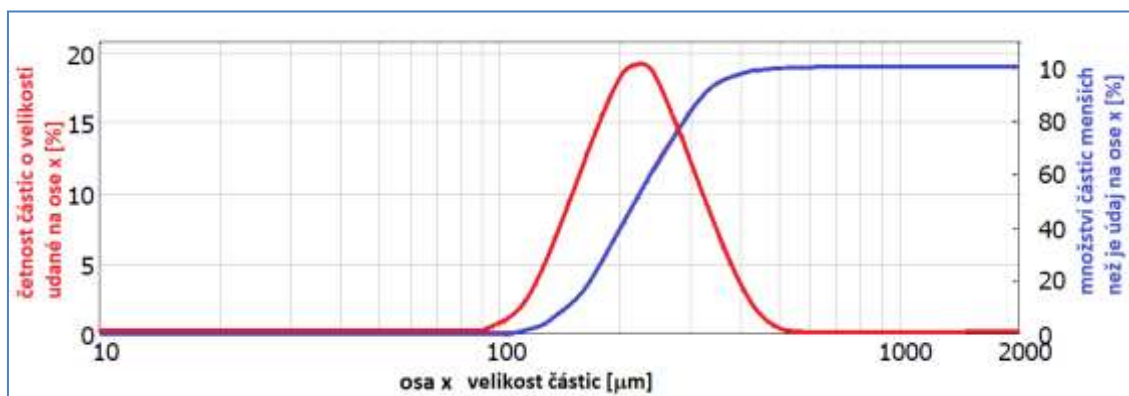


Obrázek 72: Příklad přístroje Masterziser 2000

Tabulka 11: Výsledky morfologie písku SF 003

| parametr | velikost [μm] | metoda |
|----------|----------------------------|---------|
| D(10) | 150 | LD |
| D(50) | 221 | LD |
| D(90) | 325 | LD |
| D(3/4) | 234 | LD |
| tvár zrn | ostrohranný | OM |
| KOKP | 79,4 [%] | výpočet |

- D(10) 10 % částic je pod udávanou hodnotu
D(50) 50 % částic je pod udávanou hodnotu
D(90) 90 % částic je pod udávanou hodnotu
D(3/4) střední velikost částic odpovídající síťové analýze
KOKP kritická objemová koncentrace písku

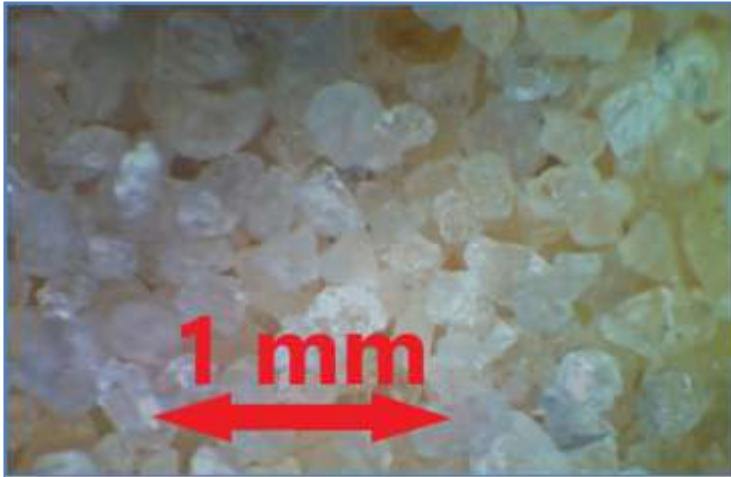


Obrázek 73: Graf ukazuje závislost množství zrn písku v % na jejich velikosti v μm

Z výsledku analýzy, jak ukazuje tabulka 11 a obrázek 73 je patrné, že nejvíce zrn obsažených v písku je o velikosti 221 μm . Písek má ve skutečnosti větší střední velikost zrn, než udává dodavatel – ten udává střední velikost 190 μm . To může mít vliv na nižší schopnost tisknout drobné detaily forem.



Obrázek 74: Tvar a velikost zrn písku FS 003 – zvětšeno 10x



Obrázek 75: Tvar a velikost zrn písku FS 003 – zvětšeno 160x

5.2.1.5 Změření olejového čísla

Olejové číslo (absorpce oleje) je veličina, která udává, kolik gramů oleje se vsákne do 100 g písku. Princip metody je založen na přidání lněného oleje byretou do zkušební vzorku. Postupně se přidává olej a směs písku a oleje se promíchává, dokud nevznikne pasta hladké konzistence, která se nerozpadá a neprská. Potom se zváží vzniklá hmota nebo odečte hodnota v mililitrech na byretě. Zkouška probíhala dle normy ISO 787-5:1980. [11N]

Zkouška ukázala, že 100 g písku FS 003 pojme 10 g lněného oleje.

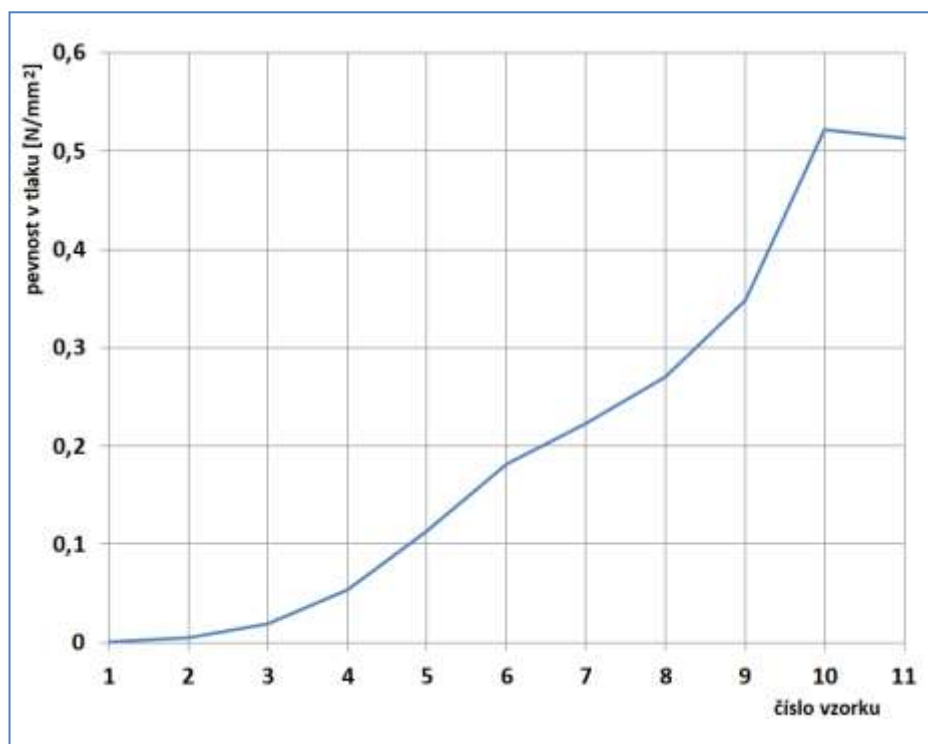
5.2.1.6 Zkouška vaznosti

Zkouška ukazuje, jak rychle reaguje pojivo s aktivátorem a jak spojí jednotlivá zrna písku v pevnou strukturu. Spočívá v rychlém namíchání směsi všech složek určených pro tisk v předepsaném poměru a ve vytvoření zkušebních válečků pomocí jednoduché válcové formy. Zkušební válečky mají rozměr $\varnothing 30 \times 50$ mm. Směs se musí pro všechny vzorky stejně upěchovat, aby výsledek byl relevantní. Vzorky bohužel nelze vytisknout na 3D tiskárně, protože se testy provádějí hned po vytvarování, a potom každých 5 minut až do ustálení pevnosti. Pevnost se měří vždy do porušení vzorku. Pro tuto zkoušku bylo vyrobeno 15 vzorků a u vzorku č. 10 a 11 byly hodnoty stejné. Tím byl test ukončen.

Výsledkem je, že směs dosahuje nejvyšší pevnosti po 45 minutách a to $0,522 \text{ N/mm}^2$.

Tabulka 12: Výsledky zkoušky vaznosti

| číslo vzorku | čas [min] | pevnost v tlaku [N/mm ²] |
|--------------|-----------|--------------------------------------|
| 1 | 0 | 0,001 |
| 2 | 5 | 0,005 |
| 3 | 10 | 0,019 |
| 4 | 15 | 0,054 |
| 5 | 20 | 0,113 |
| 6 | 25 | 0,182 |
| 7 | 30 | 0,223 |
| 8 | 35 | 0,271 |
| 9 | 40 | 0,348 |
| 10 | 45 | 0,522 |
| 11 | 50 | 0,513 |



Obrázek 76: Graf závislosti pevnosti vzorků na čase (každé číslo vzorku odpovídá časovému úseku 5 minut)

5.2.2 Zkoušky pískové tištěné struktury

Zkoumání vlastností tištěné pískové struktury proběhlo jak v neupraveném stavu přímo po vytištění, tak po úpravách napouštěním pryskyřicemi. Zkoušky neupravených i upravených vzorků probíhaly současně, aby podmínky měření probíhaly za shodných podmínek.

Proto byla nejprve provedena příprava vzorků, jejich označení a napouštění pryskyřicemi. Následně byly provedeny mechanické zkoušky na zjištění pevnosti v tahu, tlaku, ohybu a zkoušky pro změření teplotní dilatace a teplotní odolnosti.

Tisk vzorků proběhl ve svislé pozici, kdy je vrstvení písku kolmé na průřez a kdy tištěná struktura dosahuje nejnižší pevnosti. Při tisku skutečných dílů o složitých tvarech jsou také některé jejich části kolmé na vrstvení písku.

Vzorků bylo vytištěno více z důvodu pomocných zkoušek, poškození, zlomení atd.

Tisk všech vzorků probíhal najednou v jednom jobboxu, aby bylo dosaženo naprosto stejné kvality tisku (nelišila se šarže písku, vlhkost a teplota okolního vzduchu apod.). Vzorky byly očištěny od zbytkového písku a označeny.



Obrázek 77: Vytištěné a očištěné zkušební vzorky

Aby mohly být provedeny všechny zkoušky s dostatečnou přesností, bylo vytištěno 8 x 5 sad vzorků po 3 ks od každého tvaru, celkem 120 kusů:

sada č. 1 - bez úprav ve vytištěném neupraveném stavu

sada č. 2 – napuštěno Jatapol WR 90N

sada č. 3 – napuštěno Epolam 5015

sada č. 4 – napuštěno LG 735 Aero

sada č. 5 – napuštěno CHS Epodur 498 - 1667

Na základě dlouholetých zkušeností a konzultací s výrobcí laminovacích a napouštěcích pryskyřic byly vytipovány 4 typy napouštěcích pryskyřic s nízkou viskozitou. Jde o technické pryskyřice pro profesionální použití, jsou určeny k laminování, napouštění a vyztužování savých materiálů.

Uvažovalo se, že jednotlivá zrna písku jsou již obalena a slepena furanovou pryskyřicí a mohlo by dojít k nedostatečnému následnému slepení zrněk pryskyřicí. Případně by mohla furanová pryskyřice po zreagování s napouštěcí pryskyřicí degradovat a působit jako separace a snížit pevnost vzorku. Proto se volily různé pryskyřice od různých výrobců.

Charakteristiky napouštěcích pryskyřic:

Jatapol WR 90N [17]

Napouštěcí epoxidový systém pryskyřice na napouštění a stabilizaci dřeva s nízkou viskozitou, vytvrzování teplem při 85 °C

Výrobce: Jatagan, EU

Pevnost: neudáno

Viskozita: 800 mPa.s

Měrná hmotnost: 1,12 g/cm³



Epolam 5015 [2]

Laminovací pryskyřice pro infuzní laminaci.

Výrobce: Axson technologies, Francie

Pevnost v ohybu: 100 MPa

Pevnost v tahu: 60 MPa

Viskozita: 800 mPa.s

Měrná hmotnost: 1,12 g/cm³

LG 735 Aero [14]

Speciální vysokopevnostní laminovací pryskyřice se zvýšenou vazností určená pro použití v letectví.

Výrobce: GRM Systems Slatinky, Česká Republika

Pevnost v ohybu: neudáno

Pevnost v tahu: neudáno

Viskozita: 500 – 700 mPa.s

Měrná hmotnost: 1,15 -1,19 g/cm³

CHS Epodur 498 - 1667 [41]

Zalévací nízkomolekulární epoxidová pryskyřice pro zalévání elektrických a elektronických zařízení s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.

Výrobce: Spolchemie Ústí n/L, Česká Republika

Pevnost v ohybu: 90 - 100 MPa

Pevnost v tahu: 50 - 70 MPa

Viskozita: 150 mPa.s

Měrná hmotnost: 1,2 g/cm³

Jako zkušební přístroj pro provedení mechanických zkoušek byl určen univerzální zkušební přístroj Instron 3369, viz obrázek 78. Na zařízení je možné provádět mechanické zkoušky pevnosti v tahu, tlaku a ohybu.

Přístroj je uzpůsoben tak, že je na něho možné umístit další zařízení, jako např. tepelná komora, která umožňuje provádění zkoušek při různých teplotách. Dále

je vybaven pro připojení k počítači. Všechny parametry a výsledky lze zpracovávat softwarově a dále digitálně zpracovávat.

Pro upnutí zkušebních vzorků pro zkoušku pevnosti v tahu byly vyrobeny speciální tvarové kleštiny. Vzorek byl namáhán pouze tahem. Jeho upínací části nebyly vystaveny tlaku sevření kleštin a nedojde k rozdrčení vzorku. Pro ostatní zkoušky bylo využito standardní vybavení.



Obrázek 78: Zkušební přístroj Instron, vpravo je s instalovanou tepelnou komorou

Tabulka 13: Parametry zkušebního přístroje Instron 3369

| Univerzální přístroj Instron 3369 |
|--|
| bezkontaktní videoextenzometr |
| čelisti – tahová zkouška 30 kN |
| čelisti – tahová zkouška 100 kN |
| dynamický jednoosý průtahoměr |
| průhyboměr pro 3 - bodový ohyb |
| přípravek pro 3 - bodový ohyb do 5 kN |
| snímač statického zatížení 10 kN |
| snímač statického zatížení 30 kN |
| snímač statického zatížení 50 kN |
| T-drážkový stůl |
| přípravek pro tahovou zkoušku 15 kN |

Test vzlínivosti pryskyřice v tištěné pískové struktuře

Před napouštěním všech vzorků byl též proveden test vzlínivosti jednotlivých pryskyřic v tištěné struktuře. Tento pokus ukázal, do jaké hloubky je možné prosytit tištěné díly. Čtyři tyčinky určené pro zkoušku tahem byly ponořeny do poloviny své délky do kelímků s pryskyřicemi na 24 hodin. Po uplynutí této doby byla pryskyřice vytvrzena a bylo možné odměřit, jak pryskyřice vystoupala ve struktuře vzorku vysoko nad hladinu. Celý proces proběhl za teploty 21 °C a za normálního tlaku.



Obrázek 79: Zkušební vzorek v kelímku s pryskyřicí při zkoušce vzlínivosti a prosycení

Tabulka 14: Výšky nasycení vzorků v různých pryskyřicích

| pryskyřice | průměrná výška nasycení [mm] |
|---------------------|------------------------------|
| Jatapol WR 90N | 27 |
| Epolam 5015 | 30 |
| LG 735 Aero | 30 |
| CHS Epodur 498-1667 | 34 |

Test vzlínivosti ukázal, že napouštěcí pryskyřice dokáže vzlínat v tištěné pískové struktuře do výšky okolo 30 mm nad hladinu. To znamená, že při namáčení nebo dostatečném natírání pryskyřice štětcem se pryskyřice dokáže dostat do této hloubky. Musí být ale zajištěno dostatečné množství pryskyřice na povrchu dílu. Pro velké tištěné díly by se musela použít metoda natírání štětcem. Z testu vyplývá, že při oboustranné aplikaci pryskyřice štětcem lze dokonale prosytit objekt až do tloušťky stěn 60 mm.

Před sycením vzorků byly všechny jednotlivě zváženy a spočtena jejich měrná hmotnost.

Ještě byl proveden další test prosycení, a to se vzorkem 50 x 50 x 50 mm, který byl vytisknut dodatečně.

Vzorek byl opět namočen do pryskyřice Jatapol WR 90N do hloubky 20 mm po dobu 24 hod, kdy došlo k dokonalému vytvrzení. Pryskyřice Jatapol WR 90N byla zvolena z důvodu nejnižší výšky vzlínání v tištěné struktuře.

Po vytvrzení byl vzorek ve svislé rovině rozříznut na dvě poloviny a ukázalo se, že prosycení je v celém průřezu homogenní. Viz obrázek 80.



Obrázek 80: Nasycený vzorek po rozříznutí

Čtyři sady vzorků byly následně napuštěny vybranými pryskyřicemi. Tyto pryskyřice mají nízkou viskozitu a vysokou pevnost.

Míchací poměry pryskyřic a tužidel byly dodrženy podle materiálových listů jednotlivých pryskyřic dodaných výrobcem.

Vzhledem k malým rozměrům tištěných vzorků a k vysoké rychlosti gelace (tuhnutí) pryskyřic byla zvolena sice méně úsporná, ale rychlejší metoda máčení.

Test napouštění zkušebních tištěných vzorků

Před započítím napouštění všech zkušebních vzorků byl proveden ještě test, který měl ukázat správný postup, aby byly všechny testovací vzorky prosycené v celém objemu tištěné struktury, a nedocházelo k ovlivnění výsledků mechanických zkoušek.

Nejprve byly čtyři vzorky od každého tvaru ponořeny celé pod hladinu pryskyřice a vytvrzeny do 24 hodin. Potom byly rozlomeny v místě zkušebního průřezu a ukázalo se, že vzduch uzavřený ve vzorcích vlivem potopení nemohl odejít ven a nedovolil nasycení celého objemu vzorku.

Proto byla zvolena jiná metoda napouštění. Vzorky byly ponořovány ve vodorovné poloze do cca 90 % hloubky, aby z nich postupně utekl vzduch, který byl v pórech. Potom byly vzorky ponořeny celé. Tím bylo dosaženo toho, že se vzduch neuzavřel uvnitř napouštěné struktury. Namočeny byly od každého vzorku nejprve další dva kusy a ty byly rozlomeny. Na lomu byla vidět dostatečná hloubka prosycení. Po kontrole se nasýtily všechny zkušební sady vzorků tímto způsobem.



Obrázek 81: Nasycené vzorky



Obrázek 82: Lom tyčinkou s nedostatečným prosycením, uprostřed je místo bez pryskyřice



Obrázek 83: Lom tyčinkou s dostatečným prosycením

Před finálním napouštěním vzorků bylo nutné ještě stanovit metodu nedestruktivní kontroly správného nasycení. Za nejefektivnější byla vybrána metoda vážení jednotlivých vzorků před a po sycení. K tomu bylo nutné znát procentuální nárůst hmotnosti správně nasyceného vzorku.

Proto byla provedena studie struktury tištěného písku. Bylo nutné zjistit pórovitost, aby následně šlo kontrolovat prosycení vzorků.

Byly zvoleny 3 metody:

- 1) výpočet z měrné hmotnosti
- 2) odečet zaplněné a nezaplněné plochy ze zvětšených snímků struktury z mikroskopu za pomoci rastru
- 3) zkouška nasákavosti

1) výpočet z měrné hmotnosti

Výpočet byl proveden na vzorku nejjednoduššího tvaru, a to tyčince na zkoušku v ohybu.

Rozměr: 220 x 40 x 10 mm

Objem: 88 000 mm³

Skutečná hmotnost: 126 g

Měrná hmotnost tištěné struktury: 1,43 g/cm³ (0,00143 g/mm³)

Teoretická hmotnost bez pórů: 228,8 g

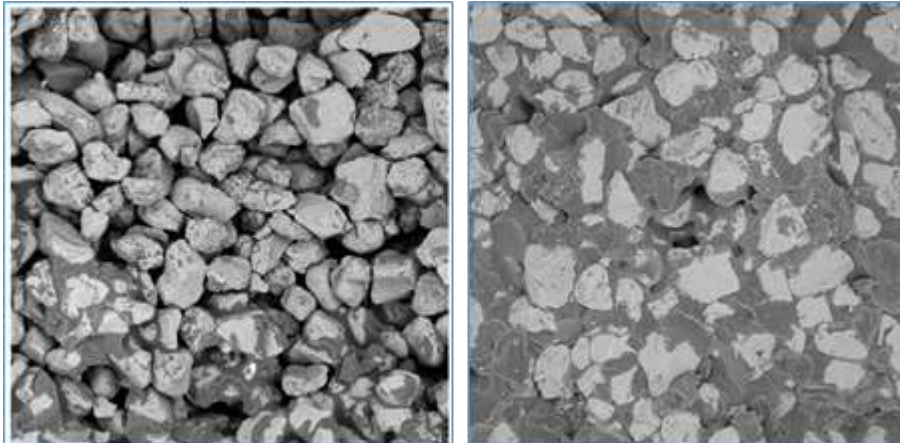
Teoretická hmotnost bez pórů byla vypočtena z měrné hmotnosti SiO₂ ve fázi křemen, pojiva a aktivátoru. (měrná hmotnost křemene je 0,0026 g/mm²).

Teoretický výpočet ukazuje, že písek, pojivo a aktivátor tvoří 55,07 % teoretické hmotnosti bez pórů.

Z toho lze dále vypočítat, že póry teoreticky tvoří 39,5 % objemu.

2) odečet ze zvětšených snímků struktury

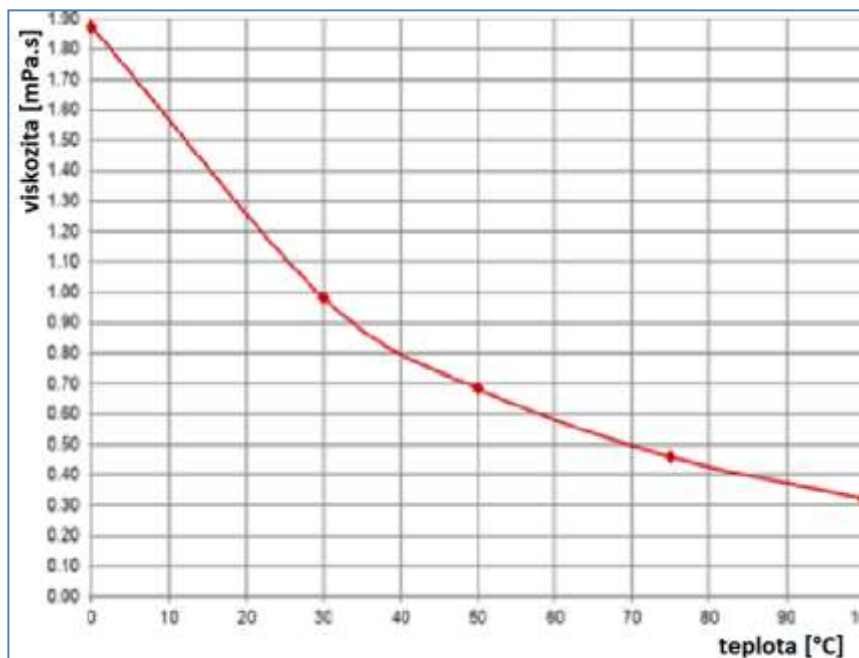
Na zvětšený snímek z mikroskopu byla promítnuta síť s milimetrovými oky a ručně byl proveden odečet zaplněné a nezaplněné plochy. Metoda je spíše orientační, nicméně potvrdila pórovitost tištěné struktury cca 30 – 35 %.



Obrázek 84: Tištěná struktura – a) nenasycená, b) nasycená

3) zkouška nasákavosti

Principem zkoušky je změřit objem kapaliny, která se vsákne do zkušební tyčinky. Aby došlo k co nejdokonalejšímu zaplnění všech pórů, byl jako penetrační kapalina použit etanol, který má velice nízkou viskozitu (při 20 °C je to 1,25 mPa.s). Proces penetrace se odehrával ve vakuové komoře, aby došlo k co nejdokonalejšímu nasycení.



Obrázek 85: Graf závislosti viskozity etanolu na teplotě

Do odměrného válce bylo nalito přesné množství etanolu 500 ml, do válce byl ponořen zkušební vzorek – tyčinka o rozměrech 220 x 40 x 10 mm. Potom bylo vše vloženo do vakuové komory. Po dokonalém napuštění vzorku byl odečten konečný objem v odměrném válci.

Bylo provedeno 5 měření, aby bylo dosaženo větší přesnosti. Z nich spočítána průměrná hodnota.

Jednoduchou metodou pomocí vážení lze zjistit prosycení tištěné struktury u libovolného tvaru.

Tabulka 15: Měření objemu pórů v tištěné struktuře

| | číslo vzorku | | | | |
|-----------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| objem etanolu ve válci [ml] | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| objem zkušební vzorku [ml] | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 |
| celkový objem [ml] | 558 | 560 | 562 | 565 | 561 |
| objem pórů [ml] | 30 | 28 | 26 | 23 | 27 |
| pórovitost vzorku [%] | 34,09 | 31,82 | 29,55 | 26,14 | 30,68 |
| průměrná pórovitost [%] | 30,45 | | | | |

Po stanovení pórovitosti a metody kontroly nasycení pomocí vážení byly všechny vzorky označeny čísly kvůli identifikaci.

Sada vzorků č. 1 byla pouze očištěna a byla zkoušena v základním stavu bez úprav nasycením.

Sady vzorků č. 2, 3, 4 a 5 byly postupně nasyceny všemi čtyřmi druhy napouštěcích pryskyřic.

Po nasycení byly všechny vzorky opět zváženy a spočteny jejich procentuální přírůstky hmotnosti. Hodnota přírůstků se pohybuje mezi 28 % a 34 % původní hmotnosti.

5.2.2.1 Zkouška pevnosti v tahu

Pro uchycení zkušební vzorku do přístroje na tahovou zkoušku byl vyvinut a vyroben speciální přípravek. Ten byl navržen tak, aby zkušební tyčinka byla namáhána pouze tahem a nedocházelo k dalšímu namáhání např. tlakem od upínacích čelistí. Navíc charakter struktury tištěné zkušební tyčinky svěrné upnutí neumožní. [25]

Zkušební tyčinka byla upnuta za rozšířené konce do plastových dělených tvarových čelistí. [9N]



Obrázek 86: Rozložený upínací přípravek včetně zkušební tyčinky

Měření bylo prováděno na zkušebním přístroji Instron 3369.

Pro odečítání hodnoty deformace byla zvolena optická metoda snímání dvou bodů nalepených přímo na zkušební tyčince. Jen tak bylo možné vyloučit pohyb mezi upínacími čelistmi a tyčinkou např. vlivem usazování pískového částečně nerovného povrchu tyčinky s hladkým povrchem čelistí.

Tabulka 16: Parametry zkoušky tahem

| typ zkoušky | zkouška tahem |
|-------------------------------|---|
| typ zařízení | Instron 3369 |
| počet vzorků [ks] | 5 sad po 5 ks |
| rozměry vzorků [mm] | ∅ upnutí 50, ∅ zúženého krčku 30, délka 120 |
| teplota prostředí [°C] | 25 |
| relativní vlhkost [%] | 40 |
| rychlost zatěžování [mm/s] | 0,5 |
| vzdálenost měřících bodů [mm] | 25 |



Obrázek 87: Snímací body nalepené na zkušební tyčince



Obrázek 88: Uspořádání zkoušky tahem. Optický snímač a tyčinka upnutá ve zkušebním přístroji.



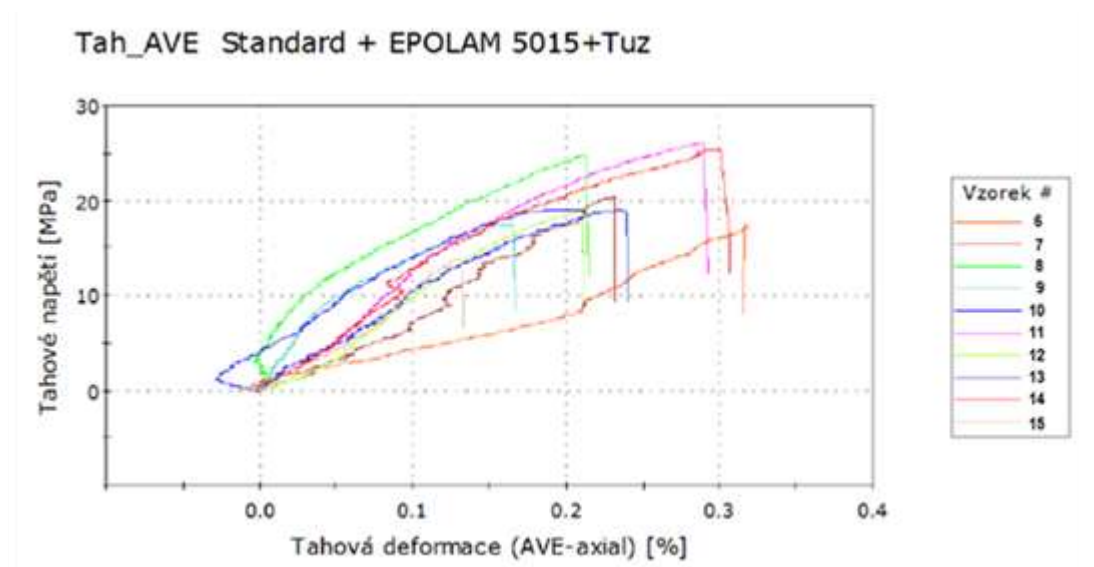
Obrázek 89: Zkušební tyčinka po testu

Tabulka 17: Výsledky měření zkoušky pevnosti v tahu

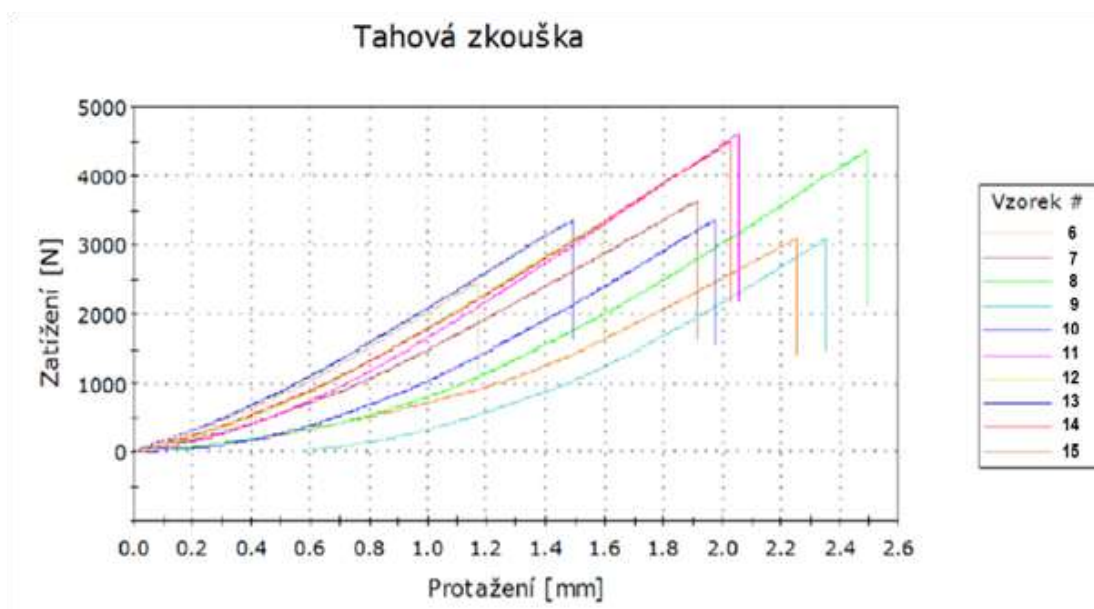
| 1. zkušební váleček rozměry: dia 50/30x120mm | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|--------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|--|
| číslo vzorku | typ pryskyřice | hmotnost [g] | | nárůst hmotnosti [g] | nárůst hmotnosti [%] | pevnost v tahu [MPa] | teoretický nárůst pevnosti [MPa] | teoretický nárůst pevnosti [%] | objem vzorku [cm ³] | měrná hmotnost před [g/cm ³] | měrná hmotnost po [g/cm ³] |
| | | před | po | | | | | | | | |
| 1 | bez | 178 | 178 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0 | 0 | 127 | 1,4 | 1,4 |
| 2 | bez | 178 | 178 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,1 | 25 | 127 | 1,4 | 1,4 |
| 3 | bez | 178 | 178 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0 | 0 | 127 | 1,4 | 1,4 |
| 4 | bez | 178 | 178 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0 | 0 | 127 | 1,4 | 1,4 |
| 5 | bez | 178 | 178 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | -0,1 | -25 | 127 | 1,4 | 1,4 |
| 6 | Jatapol WR 90N | 178 | 231 | 53,0 | 29,8 | 12 | 11,6 | 2900 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 7 | Jatapol WR 90N | 178 | 233 | 55,0 | 30,9 | 9 | 8,6 | 2150 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 8 | Jatapol WR 90N | 178 | 238 | 60,0 | 33,7 | 10 | 9,6 | 2400 | 127 | 1,4 | 1,9 |
| 9 | Jatapol WR 90N | 178 | 234 | 56,0 | 31,5 | 13 | 12,6 | 3150 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 10 | Jatapol WR 90N | 178 | 231 | 53,0 | 29,8 | 10 | 9,6 | 2400 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 11 | Epolam 5015 | 178 | 231 | 53,0 | 29,8 | 23 | 22,6 | 5650 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 12 | Epolam 5015 | 178 | 231 | 53,0 | 29,8 | 28 | 27,6 | 6900 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 13 | Epolam 5015 | 178 | 232 | 54,0 | 30,3 | 25 | 24,6 | 6150 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 14 | Epolam 5015 | 178 | 230 | 52,0 | 29,2 | 22 | 21,6 | 5400 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 15 | Epolam 5015 | 178 | 233 | 55,0 | 30,9 | 28 | 27,6 | 6900 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 16 | LG 735 Aero | 178 | 235 | 57,0 | 32,0 | 15 | 14,6 | 3650 | 127 | 1,4 | 1,9 |
| 17 | LG 735 Aero | 178 | 235 | 57,0 | 32,0 | 21 | 20,6 | 5150 | 127 | 1,4 | 1,9 |
| 18 | LG 735 Aero | 178 | 233 | 55,0 | 30,9 | 26 | 25,6 | 6400 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 19 | LG 735 Aero | 178 | 232 | 54,0 | 30,3 | 22 | 21,6 | 5400 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 20 | LG 735 Aero | 178 | 234 | 56,0 | 31,5 | 19 | 18,6 | 4650 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 21 | CHS Epodur 498-1667 | 178 | 228 | 50,0 | 28,1 | 9,2 | 8,8 | 2200 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 22 | CHS Epodur 498-1667 | 178 | 230 | 52,0 | 29,2 | 8,2 | 7,8 | 1950 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 23 | CHS Epodur 498-1667 | 178 | 229 | 51,0 | 28,7 | 8 | 7,6 | 1900 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 24 | CHS Epodur 498-1667 | 178 | 225 | 47,0 | 26,4 | 5,1 | 4,7 | 1175 | 127 | 1,4 | 1,8 |
| 25 | CHS Epodur 498-1667 | 178 | 231 | 53,0 | 29,8 | 7,6 | 7,2 | 1800 | 127 | 1,4 | 1,8 |

Tabulka 17 ukazuje naměřené hodnoty ze zkoušek měření pevnosti v tahu. Je z ní patrné, jak výrazně ovlivňují jednotlivé pryskyřice pevnost v tahu u tištěné struktury z písku.

Níže na obrázku 90 a 91 jsou pro představu znázorněny závislosti tahového napětí na deformaci a zatížení na protažení pro vzorky č. 6 až 15.



Obrázek 90: Graf závislosti tahového napětí na tahové deformaci při tahové zkoušce



Obrázek 91: Graf závislosti zatížení na protažení

Pro přehlednost výsledků zkoušky je v tabulce 18 uvedena pro porovnání pouze hodnota pevnosti v tahu jednotlivých vzorků s rozdílným nasycením z tabulky 17.

Tabulka 18: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu

| typ pryskyřice | průměrná hodnota pevnosti v tahu [Mpa] |
|-----------------------|--|
| bez syčení | 0,4 |
| Jatapol WR 90N | 10,8 |
| Epolam 5015 | 25,2 |
| LG 735 Aero | 20,6 |
| CHS Epodur 498 - 1667 | 28,4 |

Napouštěním lze dosáhnout zvýšení pevnosti v tahu z 0,4 až na 28,4 MPa, což je nárůst o 7 100 %.

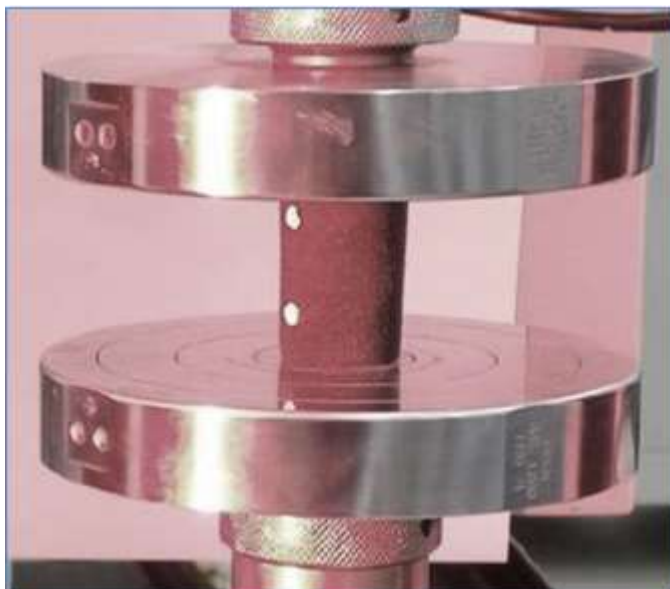
5.2.2.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Měření bylo prováděno na zkušebním přístroji Instron 3369.

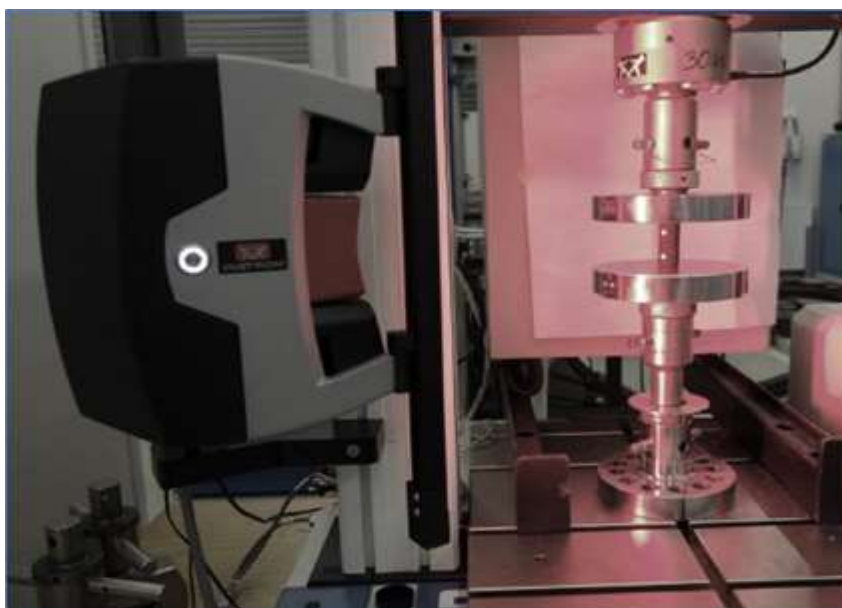
Pro odečítání hodnoty deformace byla zvolena opět optická metoda snímání dvou bodů nalepených přímo na zkušebním válečku. Tak bylo možné vyloučit pohyb mezi hladkými plochami přístroje a zkušebním válečkem. K pohybu dochází vlivem usazování pískového částečně nerovného povrchu zkušebního válečku. [9N]

Tabulka 19: Parametry zkoušky v tlaku

| typ zkoušky | zkouška tlakem |
|-------------------------------|------------------------|
| typ zařízení | Instron 3369 |
| počet vzorků [ks] | 5 sad po 5 |
| rozměry vzorků [mm] | průměr 30 mm, délka 50 |
| teplota prostředí [°C] | 25 |
| relativní vlhkost [%] | 34 |
| rychlost zatěžování [mm/s] | 0,5 |
| vzdálenost měřících bodů [mm] | 30 |



Obrázek 92: Snímací body nalepené na zkušebním válečku válečku



Obrázek 93: Uspořádání zkoušky v tlaku, optický snímač a tyčinka upnutá ve zkušebním přístroji

Při zkoušce pevnosti v tlaku byly pozorovány různé druhy destrukce závislé na použité penetrační pryskyřici.



Obrázek 94: Struktura lomu napuštěného zkušební vzorku (pryskyřice Epodur 498)



Obrázek 95: Struktura lomu napuštěného zkušební vzorku (pryskyřice WR 90N)



Obrázek 96: Struktura lomu napuštěného zkušebního vzorku (pryskyřice LG 735 Aero)



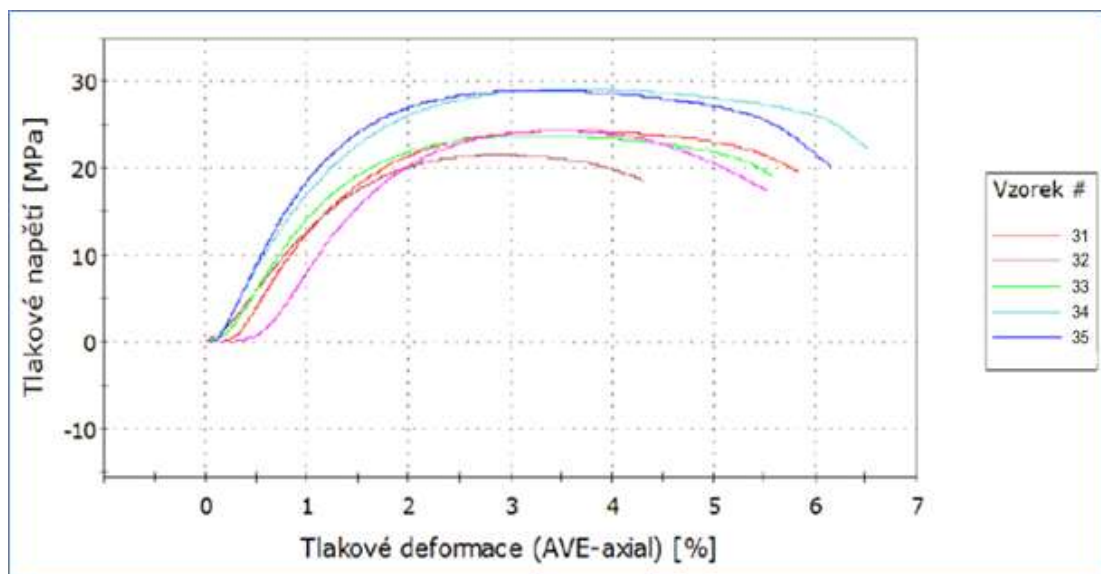
Obrázek 97: Struktura lomu napuštěného zkušebního vzorku (pryskyřice Epolam 5015)

Tabulka 20: Výsledky zkoušky měření pevnosti v tlaku

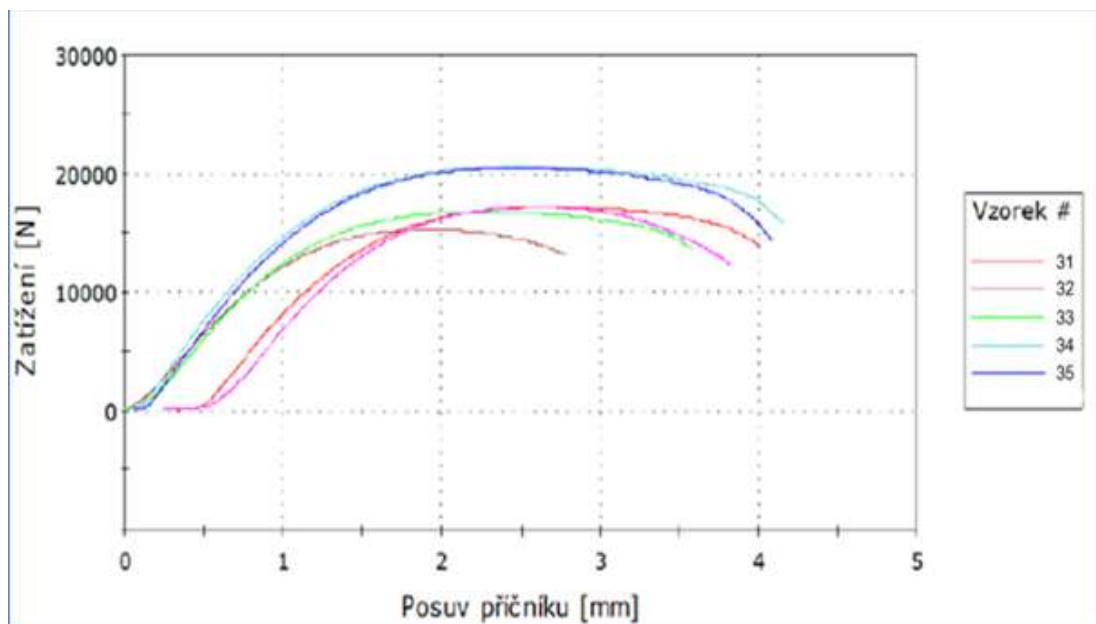
| 1. zkušební váleček rozměry: $\phi 30 \times 50 \text{mm}$ | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|--------------|-----|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|--|
| číslo vzorku | typ pryskyřice | hmotnost [g] | | nárůst hmotnosti [g] | nárůst hmotnosti [%] | pevnost v tlaku [MPa] | teoretický nárůst pevnosti [MPa] | teoretický nárůst pevnosti [%] | objem vzorku [cm ³] | měrná hmotnost před [g/cm ³] | měrná hmotnost po [g/cm ³] |
| | | před | po | | | | | | | | |
| 26 | bez | 137 | 137 | 0,0 | 0,0 | 4,6 | 0 | 0 | 98 | 1,4 | 1,4 |
| 27 | bez | 137 | 137 | 0,0 | 0,0 | 4,3 | 0 | 0 | 98 | 1,4 | 1,4 |
| 28 | bez | 137 | 137 | 0,0 | 0,0 | 4,6 | 0 | 0 | 98 | 1,4 | 1,4 |
| 29 | bez | 137 | 137 | 0,0 | 0,0 | 5,2 | 0 | 0 | 98 | 1,4 | 1,4 |
| 30 | bez | 137 | 137 | 0,0 | 0,0 | 5,3 | 0 | 0 | 98 | 1,4 | 1,4 |
| 31 | Jatapol WR 90N | 137 | 175 | 37,5 | 27,4 | 24,3 | 19,3 | 386 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 32 | Jatapol WR 90N | 137 | 172 | 35,0 | 25,5 | 21,6 | 16,6 | 332 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 33 | Jatapol WR 90N | 137 | 175 | 38,0 | 27,7 | 23,7 | 18,7 | 374 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 34 | Jatapol WR 90N | 137 | 176 | 39,0 | 28,5 | 26,8 | 21,8 | 436 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 35 | Jatapol WR 90N | 137 | 172 | 35,0 | 25,5 | 29,1 | 24,1 | 482 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 36 | Epolam 5015 | 137 | 174 | 37,0 | 27,0 | 95 | 90 | 1800 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 37 | Epolam 5015 | 137 | 172 | 35,0 | 25,5 | 78 | 73 | 1460 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 38 | Epolam 5015 | 137 | 170 | 33,0 | 24,1 | 102 | 97 | 1940 | 98 | 1,4 | 1,7 |
| 39 | Epolam 5015 | 137 | 174 | 37,0 | 27,0 | 96 | 91 | 1820 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 40 | Epolam 5015 | 137 | 171 | 34,0 | 24,8 | 91 | 86 | 1720 | 98 | 1,4 | 1,7 |
| 41 | LG 735 Aero | 137 | 174 | 37,0 | 27,0 | 52 | 47 | 940 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 42 | LG 735 Aero | 137 | 174 | 37,0 | 27,0 | 56 | 51 | 1020 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 43 | LG 735 Aero | 137 | 172 | 35,0 | 25,5 | 48 | 43 | 860 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 44 | LG 735 Aero | 137 | 174 | 37,0 | 27,0 | 57 | 52 | 1040 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 45 | LG 735 Aero | 137 | 173 | 36,0 | 26,3 | 57 | 52 | 1040 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 46 | CHS Epodur 498-1667 | 137 | 170 | 33,0 | 24,1 | 64 | 59 | 1180 | 98 | 1,4 | 1,7 |
| 47 | CHS Epodur 498-1667 | 137 | 172 | 35,0 | 25,5 | 37 | 32 | 640 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 48 | CHS Epodur 498-1667 | 137 | 172 | 35,0 | 25,5 | 71 | 66 | 1320 | 98 | 1,4 | 1,8 |
| 49 | CHS Epodur 498-1667 | 137 | 171 | 34,0 | 24,8 | 52 | 47 | 940 | 98 | 1,4 | 1,7 |
| 50 | CHS Epodur 498-1667 | 137 | 173 | 36,0 | 26,3 | 50 | 45 | 900 | 98 | 1,4 | 1,8 |

Tabulka 20 ukazuje, jak výrazně ovlivňují jednotlivé pryskyřice pevnost v tlaku u tištěné struktury.

Níže na obrázku 98 a 99 jsou pro představu závislosti tlakového napětí na deformaci a zatížení na protažení pro vzorky č. 31 až 35.



Obrázek 98: Graf závislosti tlakového napětí na deformaci



Obrázek 99: Graf závislost zatížení na posuvu příčniku

Pro přehlednost výsledků zkoušky jsou v tabulce 21 uvedeny pro porovnání pouze hodnoty pevnosti v tlaku z tabulky 20.

Tabulka 21: Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku

| typ pryskyřice | Průměrná hodnota pevnost v tlaku [MPa] |
|-----------------------|--|
| bez sycení | 4,8 |
| Jatapol WR 90N | 25,1 |
| Epolam 5015 | 92,4 |
| Lg 735 Aero | 54,0 |
| CHS Epodur 498 - 1667 | 25,3 |

Napouštěním lze dosáhnout zvýšení pevnosti v tlaku ze 4,8 až na 92,4 MPa, což je nárůst o 1 925 %.

5.2.2.3 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška (zkouška pevnosti v ohybu) probíhala v přípravku, který umožňuje provést třibodový ohyb. To znamená, že zkušební vzorek – zkušební tyčinka

je položena do přípravku na 2 podpory na koncích tyčinky a v jejím středu je vyvozován tlak. [9N]

Tabulka 22: Parametry zkoušky ohybem

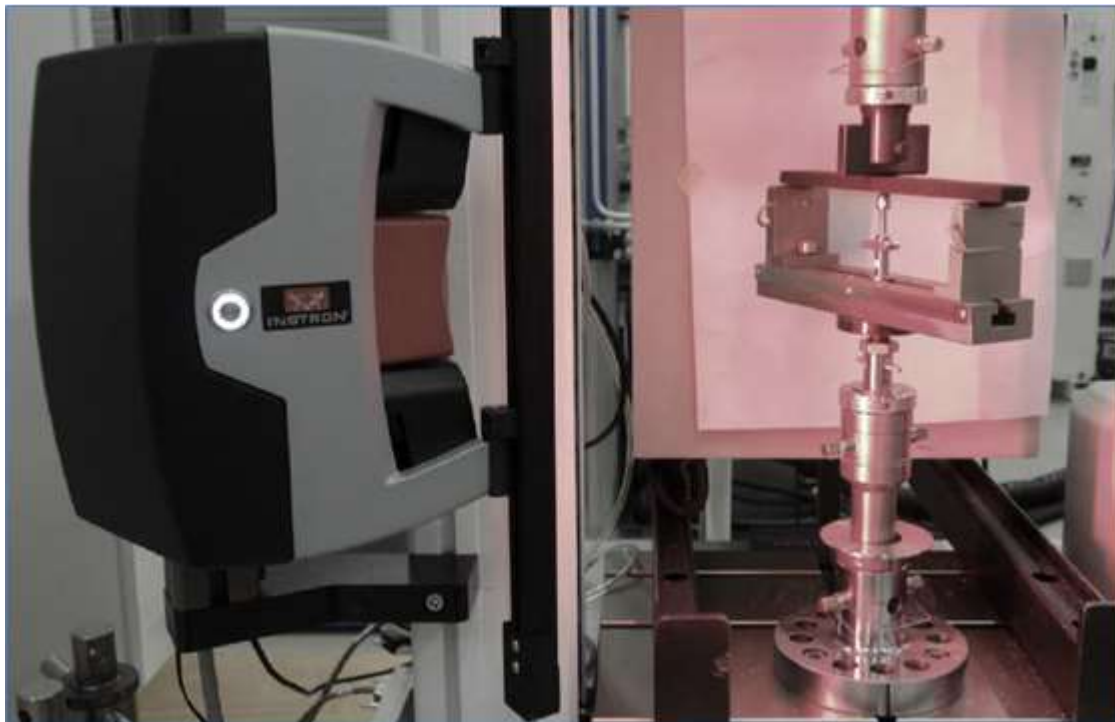
| | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| typ zkoušky | ohybová zkouška 3 bodový ohyb |
| typ zařízení | Instron 3369 |
| počet vzorků [ks] | 5 sad po 5 |
| rozměry vzorků [mm] | tloušťka 10 x šířka 40 x délka 220 |
| teplota prostředí [°C] | 25 |
| relativní vlhkost [%] | 34 |
| rychlost zatěžování [mm/s] | 1 |
| vzdálenost podpor [mm] | 200 |

Měření bylo prováděno na zkušebním přístroji Instron 3369.

Pro odečítání hodnoty deformace byla zvolena optická metoda snímání dvou bodů nalepených na přípravku, který je umístěn pod zkušební tyčinkou v místě proti čelisti, která vyvozuje tlak.



Obrázek 100: Přípravek na zkoušku v ohybu včetně zkušební tyčinky s nalepenými body



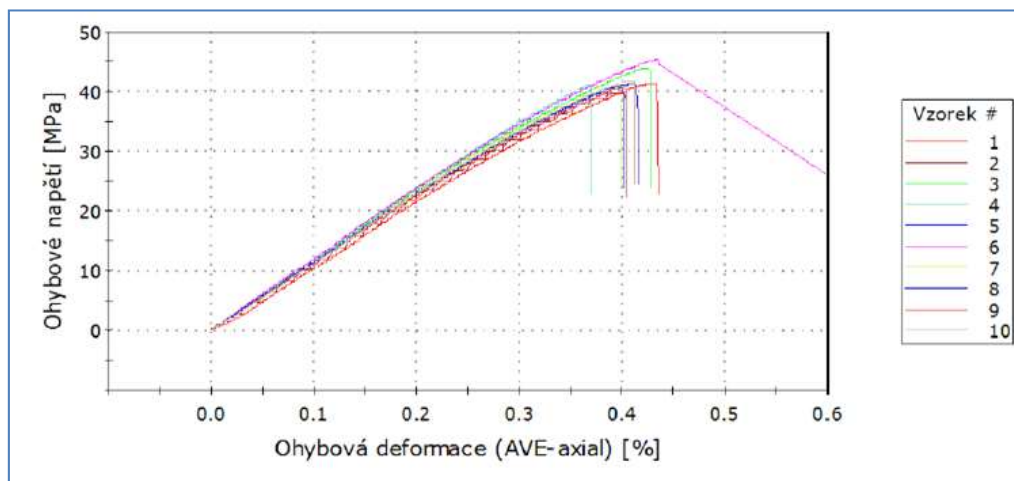
Obrázek 101: Uspořádání ohybové zkoušky, optický snímač a tyčinka položená ve zkušební přípravku



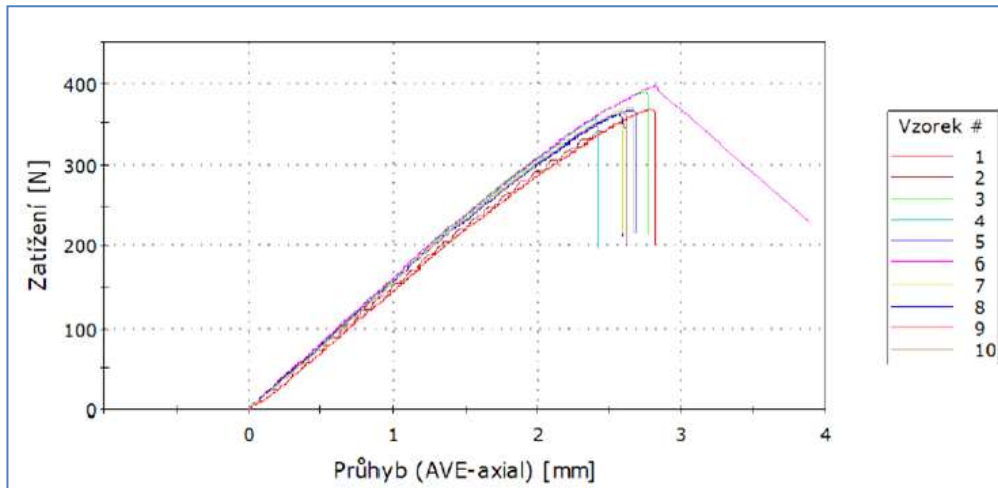
Obrázek 102: Vzorek po ohybové zkoušce

Tabulka 23: Výsledky měření zkoušky pevnosti v ohybu

| 1. zkušební tyčka rozměry: 10x40x220 mm | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|--------------|-----|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|--|
| číslo vzorku | typ pryskyřice | hmotnost [g] | | nárůst hmotnosti [g] | nárůst hmotnosti [%] | pevnost v ohybu [MPa] | teoretický nárůst pevnosti [MPa] | teoretický nárůst pevnosti [%] | objem vzorku [cm ³] | měrná hmotnost před [g/cm ³] | měrná hmotnost po [g/cm ³] |
| | | před | po | | | | | | | | |
| 51 | bez | 126 | 126 | 0,0 | 0,0 | 2,2 | 0,2 | 10 | 88 | 1,4 | 1,4 |
| 52 | bez | 126 | 126 | 0,0 | 0,0 | 2 | 0 | 0 | 88 | 1,4 | 1,4 |
| 53 | bez | 126 | 126 | 0,0 | 0,0 | 2 | 0 | 0 | 88 | 1,4 | 1,4 |
| 54 | bez | 126 | 126 | 0,0 | 0,0 | 2 | 0 | 0 | 88 | 1,4 | 1,4 |
| 55 | bez | 126 | 126 | 0,0 | 0,0 | 2,1 | 0,1 | 5 | 88 | 1,4 | 1,4 |
| 56 | Jatapol WR 90N | 126 | 165 | 39,0 | 31,0 | 10 | 8 | 400 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 57 | Jatapol WR 90N | 126 | 163 | 37,0 | 29,4 | 11,5 | 9,5 | 475 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 58 | Jatapol WR 90N | 126 | 166 | 40,0 | 31,7 | 13,2 | 11,2 | 560 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 59 | Jatapol WR 90N | 126 | 165 | 39,0 | 31,0 | 12,2 | 10,2 | 510 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 60 | Jatapol WR 90N | 126 | 165 | 39,0 | 31,0 | 12 | 10 | 500 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 61 | Epolam 5015 | 126 | 163 | 37,0 | 29,4 | 40 | 38 | 1900 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 62 | Epolam 5015 | 126 | 165 | 39,0 | 31,0 | 40 | 38 | 1900 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 63 | Epolam 5015 | 126 | 165 | 39,0 | 31,0 | 44 | 42 | 2100 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 64 | Epolam 5015 | 126 | 164 | 38,0 | 30,2 | 41 | 39 | 1950 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 65 | Epolam 5015 | 126 | 162 | 36,0 | 28,6 | 41 | 39 | 1950 | 88 | 1,4 | 1,8 |
| 66 | LG 735 Aero | 126 | 164 | 38,0 | 30,2 | 12,1 | 10,1 | 505 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 67 | LG 735 Aero | 126 | 162 | 36,0 | 28,6 | 13,5 | 11,5 | 575 | 88 | 1,4 | 1,8 |
| 68 | LG 735 Aero | 126 | 164 | 38,0 | 30,2 | 12,4 | 10,4 | 520 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 69 | LG 735 Aero | 126 | 164 | 38,0 | 30,2 | 12,7 | 10,7 | 535 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 70 | LG 735 Aero | 126 | 163 | 37,0 | 29,4 | 13,1 | 11,1 | 555 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 71 | CHS Epodur 498-1667 | 126 | 162 | 36,0 | 28,6 | 10,5 | 8,5 | 425 | 88 | 1,4 | 1,8 |
| 72 | CHS Epodur 498-1667 | 126 | 161 | 35,0 | 27,8 | 11,1 | 9,1 | 455 | 88 | 1,4 | 1,8 |
| 73 | CHS Epodur 498-1667 | 126 | 163 | 37,0 | 29,4 | 10,8 | 8,8 | 440 | 88 | 1,4 | 1,9 |
| 74 | CHS Epodur 498-1667 | 126 | 161 | 35,0 | 27,8 | 10,6 | 8,6 | 430 | 88 | 1,4 | 1,8 |
| 75 | CHS Epodur 498-1667 | 126 | 164 | 38,0 | 30,2 | 11,6 | 9,6 | 480 | 88 | 1,4 | 1,9 |



Obrázek 103: Graf závislosti ohybového napětí na ohybové deformaci



Obrázek 104: Graf závislosti zatížení na průhybu

Tabulka 24: Výsledky měření zkoušky pevnosti v ohybu

| typ pryskyřice | průměrná hodnota pevnosti v ohybu [MPa] |
|-----------------------|---|
| bez sycení | 2,0 |
| Jatapol WR 90N | 11,8 |
| Epolam 5015 | 30,0 |
| LG 735 Aero | 29,7 |
| CHS Epodur 498 - 1667 | 28,7 |

Pro přehlednost výsledků zkoušky jsou v tabulce 24 uvedeny pro porovnání pouze průměrné hodnoty pevnosti v ohybu z tabulky 23.

Napouštěním lze dosáhnout zvýšení pevnosti v ohybu z 2 až na 30 MPa, což je nárůst o 1 500 %.

5.2.2.4 Zkouška teplotní dilatace

U zkoušky byl předpoklad, že tištěná struktura v nenasyceném stavu bude mít roztažnost spíše podobnou křemičitému písku. Po nasycení pak převezme vlastnosti napouštěcí pryskyřice, protože roztažnost pryskyřic je obvykle vyšší než roztažnost křemičitého písku.

Na zkušební přístroj byla umístěna tepelná komora, která umožnila měření při navyšování teploty.

Vzorek s nalepenými referenčními body byl umístěn do tepelné komory. Nejprve byla změřena délka v počátečním stavu při teplotě 25 °C (L_0). Potom byla teplota postupně zvyšována až na 120 °C – což je teplota měknutí napouštěcí prskyřice.

Po 10 minutách výdrže na 120 °C byla odečtena změna délky ΔL_1 [mm].

Z těchto hodnot byl vypočten koeficient teplotní roztažnosti alfa [K^{-1}] podle vzorce:

$$\alpha(+25^{\circ}C, +120^{\circ}C) = \frac{\Delta L_1}{L_0 \cdot (T_1 - T_0)}$$

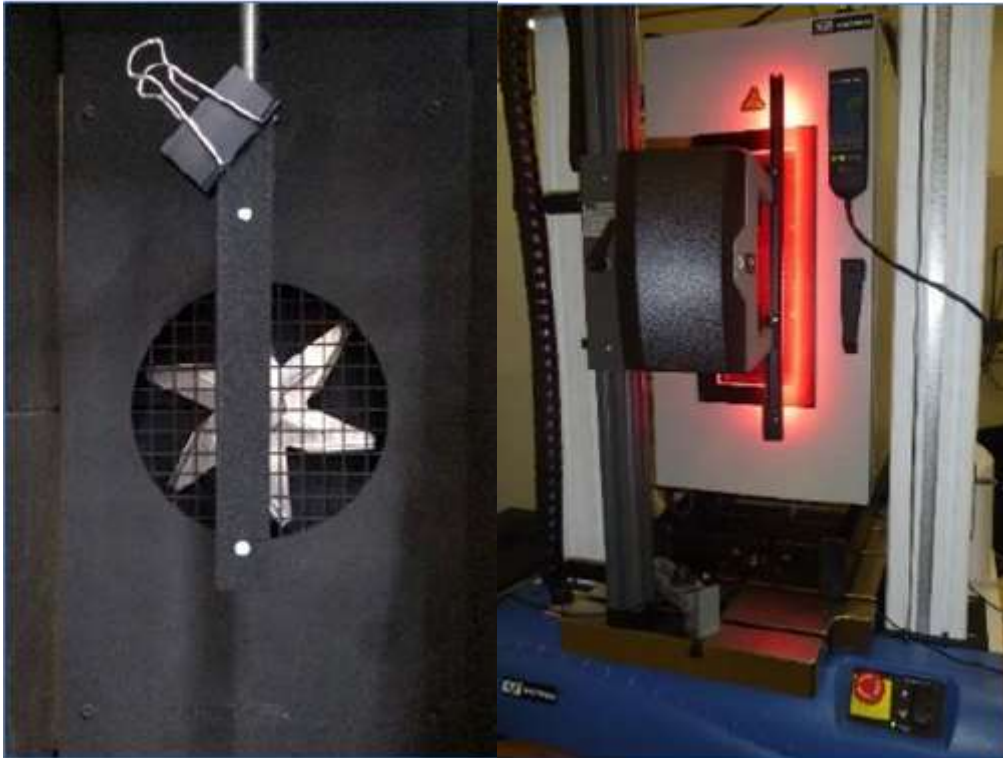
- α koeficient roztažnosti
- ΔL_1 přírůstek délky
- L_0 počáteční délka
- T_1 konečná teplota
- T_0 počáteční teplota

Tabulka 25: Parametry zkoušky teplotní roztažnosti

| typ zkoušky | zkouška teplotní roztažnosti |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| typ zařízení | Instron 3369 s tepelnou komorou |
| počet vzorků [ks] | 5 sad po 5 ks |
| rozměry vzorků [mm] | tloušťka 10 x šířka 40 x délka 220 mm |
| teplota prostředí [°C] | 25 – 120 |
| relativní vlhkost [%] | 34 |
| vzdálenost měřících bodů [mm] | 150 |



Obrázek 105: Zkušební vzorek pro měření teplotní roztažnosti s nalepenými měřícími body



Obrázek 106: Měření teplotní dilatace pomocí video – extenzometru

Měření probíhalo tak, že vzorek byl umístěn v tepelné komoře a snímání probíhalo přes ochranné sklo. Video – extenzometr byl umístěn tak, aby nemohlo dojít k nepřesnostem měření vlivem lomu světla. Posun měřících bodů se odehrává v řádech maximálně desetin mm.

Bylo provedeno měření na 5 sadách vzorků po 5 kusech a byly spočteny průměrné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti.

Tabulka 26: Průměrné hodnoty koeficientu roztažnosti

| typ pryskyřice | průměrná hodnota koeficientu teplotní roztažnosti [$K^{-1} 10^{-6}$] |
|-----------------------|--|
| bez sycení | 12,4 |
| Jatapol WR 90N | 21,1 |
| Epolam 5015 | 18,2 |
| LG 735 Aero | 19,8 |
| CHS Epodur 498 - 1667 | 24,3 |

5.2.2.5 Zkouška teplotní odolnosti

Zkouška byla provedena z důvodu zjištění teploty, při které tištěná struktura ztrácí pevnost a začíná se rozpadat.

Od výrobce tiskárny a dodavatele spotřebního materiálu, společnosti ExOne, je k dispozici pouze orientační údaj o teplotní odolnosti tištěných slévárenských forem a to, že licí kov může být litina a omezeně ocel. Z této informace vyplývá teplota 1 100 – 1 500 °C. Údaj je tedy pouze informativní. Vše závisí na poměru objemů tištěné formy a litého kovu i době působení teploty. Navíc je žádoucí, aby po ztuhnutí odlitku forma ztratila svoji pevnost a odlitek se snadno vytloukal z formy. [11, 42]

Pro zcela nové aplikace tisku se sycením je i tento údaj – hodnota teplotní odolnosti důležitý. Byl zvolen následující postup zkoušky. Jednotlivé vzorky byly umístěny do pece a byla postupně zvyšována teplota z 25 °C až na 1 100 °C. Opticky byl průběžně sledován stav vzorků každých 10 minut až do jejich rozpadnutí. Tak byly zjištěny a zaznamenány teploty viditelných změn.

Vzorky nebyly mechanicky namáhány, nejde tedy o zjištění pevnostních hodnot. Teoreticky by bylo možné dosáhnout teploty tavení křemičitého písku (1 200 – 1 550 °C podle čistoty) a slinovat zrnka písku v pevný celek s tvarem vytištěné struktury.

Z vlastností použitých pryskyřic je známo, že pryskyřice ztrácejí pevnost při teplotách okolo 100 – 150 °C a dále jen degradují. Tištěná struktura napuštěná pryskyřicí by se mohla při krátkodobém tepelném namáhání chovat jinak a udržet si svůj tvar déle. Zkouška probíhala v laboratorní peci s maximální dosažitelnou teplotou 1 600 °C. Rychlost ohřevu byla nastavena na 100 °C za hodinu, protože tištěná struktura je pórovitá a křemičitý písek má nízkou tepelnou vodivost. Rychlým ohřevem by nedošlo k dokonalému prohřátí vzorku a zkouška by byla zkreslená. [32]

Navíc byl u této zkoušky jistý předpoklad, že vzorky budou odolávat teplotě maximálně 200 °C, což je hranice odolností napouštěcích pryskyřic.

Tabulka 27: Výsledky zkoušky teplotní odolnosti vzorků

| vzorek | teplota viditelných změn [°C] | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|--------|
| | 130 | 135 | 140 | 1000 |
| Sandprint základní | | | | rozpad |
| sandprint nasycen 30% Jatapol WR90 | deformace, pění | | | rozpad |
| sandprint nasycen 30% epolam 5015 | | | deformace, pění | rozpad |
| sandprint nasycen 30% LG 735 aero | | deformace, pění | | rozpad |
| sandprint nasycen 30% Epodur 498-1667 | deformace, pění | | | rozpad |

Z výsledků je patrné, že lze nasycené tištěné struktury namáhat tepelně v rozmezí 130 až 140 °C. Potom začínají degradovat vlivem tepelných změn napouštěcí pryskyřice.



Obrázek 107: Rozpadající se zkušební vzorky v peci při teplotě 1 000 °C

Tabulka 28: Průměrné hodnoty teplotní odolnosti

| typ pryskyřice | teplotní odolnost [°C] |
|-----------------------|------------------------|
| bez sycení | 1 000 |
| Jatapol WR 90N | 130 |
| Epolam 5015 | 140 |
| LG 735 Aero | 135 |
| CHS Epodur 498 - 1667 | 130 |

5.2.3 Shrnutí výsledků provedených zkoušek tištěných pískových struktur z písku

Výsledkem všech testů a měření je přehled základních mechanických a tepelných vlastností tištěné struktury v základním i upraveném stavu v tabulce 28. V následující tabulce 29 je přehled vlastností a cen materiálů používaných v celém výrobním sortimentu společnosti Modelárna-Liaz.

Údaje o hliníkových slitinách, ocelích a plastech byly získány z materiálových listů a cen od dodavatelů firmy Modelárna Liaz, která tyto materiály běžně nakupuje a používá.

Ceny jsou z roku 2021 a nejsou v nich zohledněny žádné slevy apod., proto jsou tyto údaje platné všeobecně.

Tabulka by měla sloužit jako vodítko pro techniky při navrhování nových modifikací stávajících výrobků a poslouží všem ostatním zájemcům o aplikace těchto nových materiálů v jejich výrobě.

Tabulka 29: Porovnání vlastností tištěných struktur v různých úpravách a s běžnými konstrukčními materiály

| materiál | typ | cena/dm ³ | měrná hmotnost | koef. teplotní roztažnosti | pevnost | | | teplotní odolnost |
|-------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|------------|------------|-------------------|
| | | [Kč] | [g/cm ³] | [10 ⁻⁶ m/mK] | tah [MPa] | tlak [MPa] | ohyb [MPa] | [°C] |
| sandprint | Sandprint základní | 150 | 1,4 | 12,4 | 0,4 | 4,8 | 2 | 1000 |
| | sandprint nasycen 30% Jatapol WR90 | 280 | 1,8 | 21,1 | 10,8 | 25,1 | 11,8 | 130 |
| | sandprint nasycen 30% epolam 5015 | 290 | 1,8 | 18,2 | 25,2 | 92,4 | 30 | 140 |
| | sandprint nasycen 30% LG 735 aero | 310 | 1,8 | 19,8 | 20,6 | 54 | 29,7 | 135 |
| | sandprint nasycen 30% Epodur 498-1667 | 290 | 1,8 | 24,3 | 28,4 | 25,3 | 28,7 | 130 |
| hliník | Al.Slitina AlMg4.5 válcovaná | 320 | 2,7 | 23 | 270 | 270 | 162 | 300 |
| | Al.Slitina AlSi10Mg litá | 340 | 2,7 | 22 | 180 | 180 | 108 | 300 |
| | Al.Slitina 7075 válcovaná | 350 | 2,7 | 23 | 500 | 500 | 300 | 300 |
| ocel | ocel konstrukční | 170 | 7,8 | 13 | 300 | 300 | 180 | 450 |
| | ocel nástrojová | 220 | 7,8 | 12,6 | 650 | 650 | 390 | 470 |
| | ocel letecká 4140 | 400 | 7,8 | 10 | 2000 | 2000 | 1200 | 500 |
| plast | polyamid | 60 | 1,1 | 110 | 65 | 82 | x | 85 |
| | necuron 540 | 74 | 0,5 | 40 | 7 | 20 | 20 | 55 |
| | necuron 651 | 110 | 0,6 | 40 | 12 | 26 | 30 | 65 |
| | necurrom 1007 | 280 | 1,2 | 50 | 30 | 70 | 72 | 75 |
| | polypropylen | 800 | 0,9 | 32 | 30 | 70 | x | 100 |
| | polykarbonát | 400 | 1,2 | 70 | 55 | 70 | x | 90 |
| epopast 400 | 330 | 0,9 | 10 | 43 | 51 | 45 | 70 | |

5.3 Využití upravené tištěné struktury pro výrobu funkčních dílů a přípravků

Úpravou tištěné struktury napouštěním vznikl nový materiál s novými parametry. Jde o písek vyztužený pryskyřicí. Tento materiál dostal název *Pískový kompozit*. Podstata nového materiálu a výrobků z něj je, že tiskem vznikne tvar a napouštěcí pryskyřice mu dodá požadované vlastnosti. [12PC]

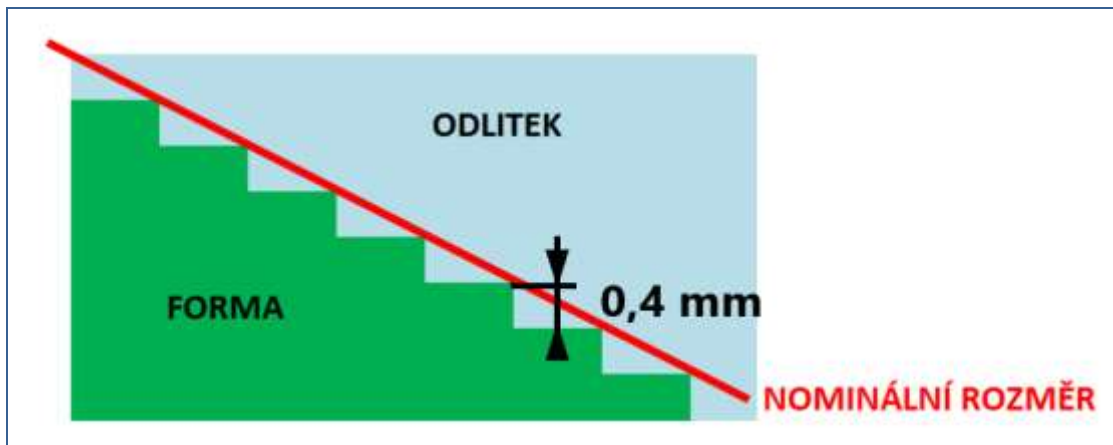
V tabulce 30 jsou oranžově označeny vybraní představitelé výrobků – nástrojů, přípravků a dílů, které byly vyrobeny a podrobeny zkouškám ve skutečném provozu. Jde o výběr z tabulky 6.

Tabulka 30: Označené výrobky, které se vyrobily a testovaly

| POUŽITÍ | | VLASTNOSTI | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|------------|------|------|----------------|-------------------|------------|--------------|---------------|----------------|----------|---------------|
| | | TAH | TLAK | OHYB | NÍZKÁ DILATACE | TEPLOTNÍ ODOLNOST | PRODYŠNOST | NEPRODYŠNOST | HLADKÝ POVRCH | NÍZKÁ HMOTNOST | KŘEHKOST | OBROBITELNOST |
| | SVAŘOVÁNÍ | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| | MĚŘENÍ | | | | ■ | | | | | | | |
| | DOCHLAZOVÁNÍ | | | ■ | | | | | | | | |
| | LAMINOVÁNÍ | ■ | ■ | ■ | | ■ | | ■ | ■ | | | ■ |
| | SVÉVÁRENSTVÍ | ■ | ■ | ■ | | | | ■ | ■ | | | |
| DÍLY/VÝROBKY | DESIGN | ■ | ■ | ■ | | | | | ■ | | | ■ |
| | AERODYNAMIKA | ■ | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | |

Při tisku všech dílů je nutno brát v úvahu schodovitý povrch tištěné struktury, který vzniká na šikmých plochách dílu nanášením vrstev písku při tisku. V některých případech je nutné schodovitý povrch obrousit pro dosažení hladkého povrchu.

3D tiskárna je nastavena tak, že schody na povrchu pískové formy jsou „do mínusu“ a tedy pod nominální rozměr 3D dat a na odlitku jsou „do plusu“, viz obrázek 108. Proto se tiskárna musí přenastavit, aby to bylo opačně. Po obroušení schodovitého povrchu na vytištěném dílu se dostane nominální rozměr.



Obrázek 108: Schodovitý povrch formy a nominální rozměr odlitku



Obrázek 109: Schodovitá struktura povrchu tištěné pískové struktury

5.3.1 Přípravky na svařování

Svařovací přípravky slouží k ustavení dílů při svařování. Využití najdou hlavně při výrobě tvarově složitých svařenců složených z více dílů. Během této operace musí odolávat mechanickému namáhání při manipulaci se svařovanými díly i při manipulaci a skladování samotného přípravku. [6VV]

Typickým reprezentantem je přípravek na svařování výfuku. S jeho pomocí jsou svařovány díly z plechu a trubek v různých úhlech. Požadovaná přesnost svařence je v řádech desetin mm. To tištěný přípravek s rezervou splňuje.

Testy ukázaly, že tištěná struktura se nemusí pro série do 20 ks nijak upravovat a při běžné manipulaci vydrží.

Pro větší série je lepší přípravek napustit pryskyřicí a v místech svárování udělat odlehčení [9VV]. Horký svár tak nepříjde do styku s přípravkem přímo. Přípravek vydrží i 1 000 kusů. Obdobné příptavky lze tisknout i na lepení a montáž menších sestav. [6VV, 8VV, 9VV]



Obrázek 110: Svařovací přípravek vyrobený technologií sandpint svařencem kolena výfuku



Obrázek 111: Svařovací přípravek vyrobený technologií sandpint svařencem tlumiče výfuku

5.3.2 Přípravky pro měření

Přípravky pro měření slouží obvykle pro ustavení tvarově složitých kontrolovaných dílů při měření např. scannerem, nebo jsou opatřeny indikátory. Kontrolované díly se vkládají přímo do přípravků. [3P]

U přípravků je nutná hlavně tvarová stabilita. Ta je dána jejich tvarem a vlastnostmi použitého materiálu. Právě pro složitý tvar přípravků lze s velkou výhodou použít díly vyrobené technologií sandprint a vyztužené pryskyřicí. [1PC, 3P]

Na obrázku 112 je přípravek na kontrolu tvaru a prohnutí autoskla. Tvarově složitý, tmavě červený díl, je vyroben technologií sandprint. Obráběním z bloku materiálu by byl několikanásobně dražší a 80 % polotovaru pro výrobu by bylo při finálním obrábění odstraněno. Stejné požadavky jsou i na obdobné kontrolní přípravky, díly ve střížných nástrojích, funkční a kontrolní makety, zástavbové modely a podobně. [2VV, 3VV - 9VV. 1P]



Obrázek 112: Přípravek pro měření tvaru skla

5.3.3 Přípravky na dochlazování

Přípravky na dochlazování slouží jako tvarová podpora pro vychladnutí dílů z měkkých plastů po lisování za tepla. Typickými představiteli těchto dílů jsou vnitřní obkladové panely automobilů, stropnice, tvarové koberce a hlukové i tepelné izolační prvky. Přípravky mají obvykle složitý tvar a jsou opatřeny sítí vzduchových chladících otvorů. Na přípravky bývá kladen požadavek tvarové přesnosti v řádech milimetrů, stability, teplotní odolnosti do cca 100 °C a odolnosti proti otěru. Stejně vlastnosti mají i např. ořezové přípravky sloužící jako podpora při ořezu vodním paprskem. [5VV, 8VV, 9VV, 3P]

Na obrázku 113 je dochlazovací přípravek na zvukovou izolaci o rozměrech 1 000 x 1 000 mm.



Obrázek 113: Přípravek na dochlazování

5.3.4 Přípravky na laminování

Přípravky na laminování vyrobené technologií sandprint mohou být ve dvou provedeních:

- 1) Přípravky z nevyztužené tištěné struktury – slouží k laminování na model, který se po vytvrzení nalaminovaného kompozitu rozbije a odstraní. Pro tento typ přípravků lze s výhodou využít toho, že se laminovací model vytiskne pouze jako dutá skořepina vyplněná nezpevněným podpůrným pískem. Po laminování a vytvrzení se do modelu vyvrtá otvor, nezpevněný písek uvnitř se vysype a model se snadno rozbije a odstraní. Takto lze laminovat tvarové duté díly jako např. potrubí, vzduchové kanály, designové objekty a díly karoserií, které mají neodformovatelné tvary s podkoso. [7VV, 13PC]



Obrázek 114: Kompozitový díl vyrobený za pomoci nevyztuženého modelu

- 2) Přípravky z tištěné struktury vyztužené pryskyřicí slouží hlavně jako permanentní laminovací makety pro malosériovou výrobu a jako lepící přípravky pro slepování laminovaných dílů do větších celků – sestav. Jsou tvarovány tak, aby bylo možné laminovaný díl po vytvrzení sejmout bez poškození dílu i přípravku. Takto se vyrábějí např. spojery pro motorsport a tuning či prototypové díly karoserií vozidel a letadel. [8VV, 9VV, 13PC, 3P]

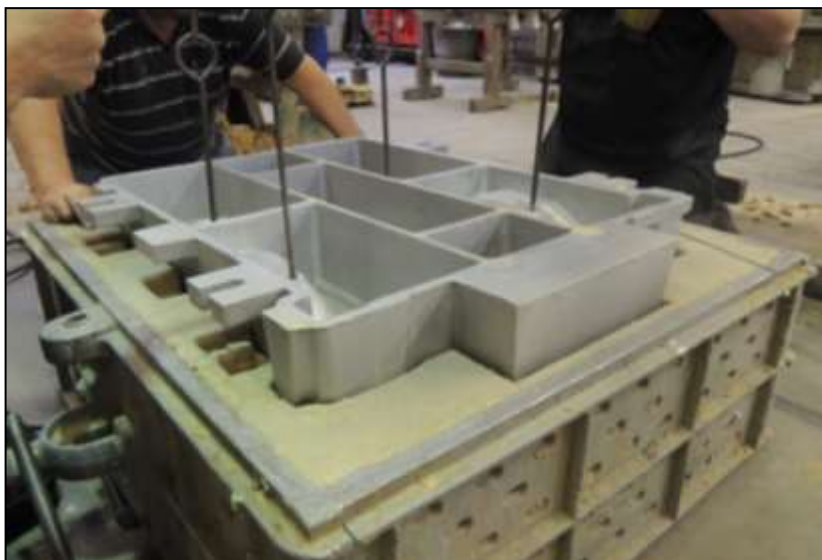


Obrázek 115: Laminovací forma na výrobu kapotáže vrtulníku vyrobená technologií sandprint (vlevo) a vyrobený kompozitní díl (vpravo)

5.3.5 Přípravky pro slévárství

Technologie byla primárně určena pro slévárství. S možností vyztužování tištěné struktury lze navíc tisknout formovací modely, modelová zařízení a formovací desky. Na těchto přípravech se musí dodatečně upravit povrch, aby byl hladký pro snadné odformování. [2 - 7PC, 1VV, 10VV, 11VV]

Hlavní výhodou je softwarová možnost modifikace tvaru modelových zařízení. Při změně tvaru lze vytisknout oblast změny jako samostatný vložený díl a vyfrézovat kapsu do modelového zařízení. Do této kapsy se potom vloží, případně vlepí tento díl s novým tvarem. [2 - 7PC, 1P, 3P, 4P]



Obrázek 116: Vytištěný formovací model při výrobě pískové lící formy

5.3.6 Zástavbové modely, funkční a pomocné makety

V oblasti designu a aerodynamiky mají makety vyrobené technologií sandprint velmi široké uplatnění. Vlastnosti tištěné struktury plně vyhovují v nevyztuženém i vyztuženém provedení. Lze takto vyrábět makety v řádech desítek mm až metrů. Makety jsou většinou vhodné jako kusové výrobky pouze pro ověření vzhledu a aerodynamiky. Po vyztužení napuštěním pryskyřicí je lze opatřit pohledovými povrchovými úpravami. [2VV, 7VV - 9VV, 1PC, 2VV, 7 -9VV, 1P, 3P, 4P]



Obrázek 117: Designová maketa kapotáže vrtulníku vyrobená technologií sandprint



Obrázek 118: Maketa kapotáže SS151 vyrobená technologií sandprint určená pro test v aerodynamickém tunelu

6 Diskuse výsledků

Práce se zabývá poznáním možností nejméně rozšířené technologie ze skupiny Rapid prototyping, a to 3D tisku z písku tzv. sandprint s hlavním využitím ve strojírenství. Technologie je primárně určena pro výrobu jednorázových slévárenských forem z pískové směsi pojené furanovou pryskyřicí.

Byly prostudovány výsledky výzkumu zabývající se technologií sandprint u nás i v zahraničí [26, 31, 34, 35, 37, 38, 43, 44, 45, 46]. Zde se většina vědeckých pracovišť zabývala měřeními a úpravami parametrů 3D tiskáren a výslednými vlastnostmi tištěné struktury pouze pro účely slévárenství [30, 32]. Šlo o změny mísících poměrů písku, pojiva i aktivátoru se záměrem změnit mechanické vlastnosti tištěné struktury [5, 12, 15, 24, 39, 40, 44, 67].

Dále byla zkoumána optimalizace vtokové soustavy a simulace lití i tuhnutí taveniny, tepelnými poměry uvnitř forem a jejich chlazením [8, 18, 19, 29, 32, 33, 47].

V praxi však některé úpravy parametrů tisku nelze na tiskárně upravovat mimo doporučené hodnoty bez svolení výrobce tiskárny s ohledem na ekologii i záruční a servisní podmínky. Proto byly zvoleny cíle, jak využít tištěnou pískovou strukturu s parametry tisku doporučenými výrobcem tiskárny a zaměřit se na její efektivní využití v následujících směrech.

Prvním cílem bylo nalezení krajních možností vytištěné pískové struktury technologií sandprint při použití ve slévárenství. Šlo o to zjistit skutečné vlastnosti tištěné struktury a prozkoumat krajní možnosti a výhody technologie sandprint ve slévárenství při odlévání detailů. Účelem experimentu bylo zjistit limity v odlévání členitých odlitků s detaily o rozměrech od 3 mm. Formy byly vytištěny za standardních parametrů doporučených výrobcem tiskárny a nebyly na nich provedeny žádné dodatečné úpravy jako např. ochranný nátěr. Výsledky ukázaly, že limitem pro odlévání detailů je i pevnost samotné pískové formy. Všechny detaily se podařilo bez problémů odlít a formy vydržely tepelné namáhání od taveniny.[2P] Při konstrukci formy byly využity údaje ze zdroje [23]. Výsledky experimentů je obtížné porovnat s ostatními zdroji, protože výsledky výzkumu a technologie si slévárny přísně tají.

Na základě experimentů vznikla publikace *Ověřená technologie: Optimální technologie výroby odlitků do 3D tištěných forem*. [10VV]

Druhým cílem bylo nalezení následné úpravy struktury tištěné technologií sandprint pro zlepšení mechanických vlastností. Po analýze spotřebních materiálů 3D tiskárny a testech mechanických a fyzikálních vlastností tištěné struktury byly navrženy a provedeny úpravy tištěné struktury pro změnu mechanických vlastností. Po změření dosažených výsledků bylo zjištěno navýšení pevnosti v řádech desetinásobků. Například pevnost v ohybu byla zvýšena z původních 2 MPa až na 30 MPa. Porovnání s dalšími zdroji je možné pouze nepřímě. Zdroj [40] ukazuje výsledky úprav tištěné struktury změnami parametrů tisku a následnou tepelnou úpravou pro lepší vytvrzení a dosáhl pevnosti v ohybu až 3,3 MPa, tedy přibližně 1,5 násobku. Zdroj zabývající se přímo úpravou následným napouštěním tištěné struktury se nepodařilo najít. To potvrdila i provedená patentová rešerše.

Na základě experimentů vznikly následující publikace:

- *Ověřená technologie: Úpravy povrchu 3D tištěných povrchových struktur* [8VV]
- *Ověřená technologie: Zpevňování 3D tištěných pískových tvarů* [9VV]

Třetím cílem bylo ověřit možnosti využití upravené tištěné struktury pro výrobu funkčních dílů a přípravků. Na základě výsledků z experimentů vznikl nový materiál nazvaný pískový kompozit. Podle výsledků měření fyzikálních vlastností byly dle tabulky 30 vytipovány vhodné představitelé výrobků. Tyto výrobky – díly byly vyrobeny a otestovány v běžném provozu.

Jednalo se o následující výrobky:

- Svařovací přípravek
- Měřicí přípravek
- Dochlazovací přípravek
- Laminovací přípravek
- Modelové zařízení pro výrobu pískových forem
- Designová maketa
- Maketa do aerodynamického tunelu



Všechny tyto výrobky během testování plnily svoji funkci podle požadavků a nedošlo k jejich poškození.

Hlavním přínosem je výrazné zkrácení doby výroby dílů a přípravků z pískového kompozitu. Při porovnání s konvenční výrobou např. u modelového zařízení pro výrobu pískových forem se pomocí technologie sandprint zkrátila doba výroby z 300 hodin na 30 hodin, což je desetina.

Byla provedena patentová rešerše, která ukázala, že obdobným použitím technologie sandprint s následnou úpravou se v Evropě nikdo oficiálně nezabývá. Proto byly přihlášeny a uděleny následující dokumenty:

- Vynález: *Modelové zařízení a způsob jeho výroby* [1VV]
- Vynález: *Modelové zařízení a způsob jeho výroby* [2VV]
- Užitný vzor: *Kontrolní přípravek pro kontrolu zakřivení vnitřního obkladového panelu stropu automobilu* [3VV]
- Užitný vzor: *Funkční tvarové díly ve střížných nástrojích* [4VV]
- Užitný vzor: *Ořezový přípravek* [5VV]
- Užitný vzor: *Přípravek na svařování výfuku* [6VV]
- Užitný vzor: *Funkční a pomocná maketa* [7VV]
- Prototyp modelového zařízení vyrobený technologií 3D tisku písku [11VV]

7 Závěr a splnění cílů

Po provedení rešerše současného stavu v požívání technologie sandprint byly stanoveny 3 hlavní cíle práce a jejich splnění bylo dosaženo s následujícími výsledky:

Cíl 1 - Nalezení krajních možností vytištěné pískové struktury technologií sandprint při použití ve slévárenství.

Byly vybrány tvarové detaily, které se na moderních lehkých hliníkových odlitcích vyskytují nejčastěji. Jsou to tenká výztužná žebra, výstupky, předlité otvory a drážky. Byly navrženy a připraveny tvary testovacích vzorků, k nim byly navrženy a vytištěny pískové formy. Odlitky byly do těchto forem odlity ve třech různých polohách.

Nakonec bylo provedeno vyhodnocení s následujícími výsledky:

Pozitivní:

- všechny zkušební odlitky byly úspěšně odlity včetně detailů
- formy měly dostatečnou prodyšnost, plyny vznikající ve formě unikly přes stěnu forem, a to i v případě detailů o tloušťce nebo \varnothing 3 mm
- lze předlévat malé otvory od \varnothing 3mm až o hloubce 80 mm
- nedošlo k poškození detailů formy vlivem působení tlaku taveniny

Negativní:

- při čištění forem od písku běžným postupem pomocí štětců a tlakového vzduchu došlo k poškození drobných detailů formy
odlitky měly vyšší hodnotu drsnosti povrchu způsobenou charakterem stavby tištěné struktury, v porovnání s odlitky vznikající konvenční technologií formováním do písku

Praktické testy ukázaly, že při vhodně navržené konstrukci slévárenské formy lze vyrobit i velmi tvarově komplikovaný odlitek a že lze ušetřit náklady na následné dokončování. Technologie umožňuje výrobu odlitků v kusových sériích s kvalitou sériového odlitku.

Cíl 1 byl splněn.

Cíl 2 - Nalezení následné úpravy struktury tištěné technologií sandprint pro zlepšení mechanických vlastností

Ke splnění cíle 2 byla provedena analýza spotřebních materiálů pro provoz 3D tiskárny a testy fyzikálních vlastností tištěné struktury. Na základě výsledků byly navrženy úpravy tištěné struktury pro změnu mechanických vlastností, hlavně pro dosažení vyšší pevnosti. Dále byly vytipovány a odzkoušeny napouštěcí pryskyřice, kterými byly následně napuštěny zkušební vzorky. Byl odzkoušen postup napouštění vzorků a kontrola jejich nasycení. Nově dosažené vlastnosti upravené struktury byly změřeny při zkouškách. Výsledky byly zpracovány a porovnány s ostatními běžnými materiály používanými ve strojírenství. Vznikl tak zcela nový materiál, který dostal název pískový kompozit. [9VV].

Lze ho využívat jako materiál pro výrobu přípravků, modelů i funkčních strojních součástí [2VV, 4VV - 11VV].

Tabulka 29 ukazuje, že nárůst pevnosti po úpravě je v řádech desetinásobků. Pevnost v tahu je až 28,4 MPa, v tlaku 92,4 MPa a v ohybu 30 MPa.

Cíl 2 byl splněn.

Cíl 3 - Ověřit možnosti využití upravené tištěné struktury pro výrobu funkčních dílů a přípravků

Ke splnění cíle 3 byly vytipovány výrobky z oblasti automotive a aviation, které je možné vyrobit z nového pískového kompozitu. Výrobky byly zhotoveny a jejich funkce byla ověřena v praxi. Výsledky byly pozitivní a všechny výrobky vyhovely požadavkům. Technologie sandprint ukázala nové možnosti technologické přípravy a vlastní výroby funkčních dílů. Jedním z příkladů je vývoj bezpilotního plně autonomního vrtulníku SkySpotter SS151 ve firmě Modelárna-Liaz. Využití několika moderních technologií z oblasti rapidprototyping, včetně sandrintu zkrátilo výrobu prvních prototypů o cca 75 %.

Všechny tyto experimenty pomohly dospět ke stanoveným cílům. Výsledky byly ihned po otestování v laboratorních podmínkách vyzkoušeny v praxi na konkrétních

projektech. Podařilo se tak dokázat, že i materiály na základě písku mohou být plnohodnotně použity při výrobě ve strojírenství, průmyslovém designu a podobně.

Vzhledem k příznivým cenám vstupních materiálů, a i samotného procesu tisku, je velice pravděpodobné, že sandprint bude i nadále pronikat do procesů strojírenské výroby a postupně nahrazovat některé konvenční technologie. Proces tisku umožňuje vytvořit v podstatě výrobek jakkoliv členitého tvaru i různé vnitřní struktury. Pomocí následných úprav lze dát tomuto výrobku požadované vlastnosti. Úpravy napouštěním je možné provádět na díle i lokálně. Tím lze uspořit napouštěcí pryskyřici a kombinovat na jednom díle více typů úprav.

Byla následně provedena patentová rešerše na evropské úrovni, která ukázala, že tištěnou strukturu v kombinaci s napouštěcí pryskyřicí nikdo nevyužívá. Proto byly výsledky konkrétního použití ochráněny jako Vynález [1VV, 2VV], Užitný vzor [3VV – 7VV], Ověřená technologie [8VV – 10VV] a Prototyp [11VV]. Všechny tyto postupy byly zavedeny do výroby běžně se využívají.

Jedním z příkladů je vývoj bezpilotního plně autonomního vrtulníku SkySpotter SS151 ve firmě Modelárna-Liaz. Využití několika moderních technologií z oblasti rapidprototyping, včetně sandprintu zkrátilo výrobu prvních prototypů o cca 75 %.



Obrázek 119: SkySpotter SS151 – bezpilotní vrtulník



Tato nová technologie i nové materiály umožňují snížit výrobní náklady a zkrátit časy v oblasti technické přípravy výroby, v tzv. TPV. Současně mnohonásobně zrychlují komunikaci mezi konstruktérem a technologem, respektive mezi výkresem a výrobkem, a to i v náročném metalurgickém procesu.

Výzkum ukázal, že 3D tisk neustále proniká do všech oblastí strojírenství. S jeho správným využitím lze výrobní náklady mnohonásobně snížit a výrobu včetně TPV značně urychlit. To má své uplatnění převážně v oblasti prototypů a zakázkové výroby.

Zásadním cílem i přínosem této práce je přispět k naplnění procesu digitalizace v současné etapě vývoje ve strojírenství nazývané též někdy " Průmysl 4.0 ".

Cíl 3 byl splněn.

8 Seznam použité literatury

- [1] 3dprintingmedia.network. 2021. *Phenol Direct Binding (PDB)*. 3D Printing Media Network [online]. [cit. 2020- 01- 06]. Dostupné z:
[https://www.3dprintingmedia.network/additivemanufacturing/am- technologies/
what-is-phenol-direct-binding/](https://www.3dprintingmedia.network/additivemanufacturing/am-technologies/what-is-phenol-direct-binding/)
- [2] Aksonturk.com. 2006. *AXSON technologies, EPOLAM 5015*. [online].
[cit. 2021-08-29]. Dostupné z:
http://aksonturk.com/epoksi_laminasyon_recineleri/parca_yapimi_icin/epolam5015-2025/epolam5015-2025-gb.pdf
- [3] ALMAGHARIZ, E., S., CONNER, B., P., LENNER, L., I. 2016. *Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores*. Inter Metalcast 10, s.240–252.
- [4] BABAK, K. 2016. *Wohlers report 3D printing and additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates. ISBN 978-0-9913332-2-6.
- [5] BRYANT, N., FRUSH, T., THIEL, J., MACDONALD, E., WALKER, J. 2020. *Influence of Machine Parameters on the Physical Characteristics of 3D-Printed Sand Molds for Metal Casting*. International Journal of Metalcasting.s. 15.
- [6] ExOne. *S-Max Furan – Digital Core Production*. 2014. Augsburg.
- [7] ExOne. *S-Max_Furan_Catalogue_Rev_4_2014*. Katalog dodaný k tiskárně S-Max, vyžádaný Email od firmy ExOne
- [8] ExOne. *Corporate Slides World OverviewUpdate*. Prezentace firmy ExOne pro rok 2021, vyžádaný Email od firmy ExOne

- [9] ExOne.cz. 2021. *ExOne uses Binder Jetting technology to 3D print complex parts in industrial-grade materials*. [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z:
<https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>
- [10] ExOne.cz. 2021. *Industry Grade Materials: Currently supported materials for ExOne® Systems*. [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z:
<http://www.exone.com/Resources/Materials>
- [11] ExOne.cz. 2021. *What Is Binder Jetting?: 3D Printing Simply Explained* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z:
<https://all3dp.com/2/what-is-binder-jetting-3d-printingsimply-explained/>
- [12] GAO, G., ZHANG, W., DU, Z., LIU, Q., SU, Y., SHI, D. 2021. *Investigation of selected parameters effect on 3D printed sand mold properties through Taguchi method*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 27 No. 3. ISSN: 1355-2546.
- [13] GRIMM, T. 2004. *User's guide to rapid prototyping*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers. ISBN 0872636976.
- [14] GRM-systems.cz. 2021. *Pryskyřice a tužidla*. [online]. [cit. 2021-08-29]. Dostupné z:
<http://grm-systems.cz/pryskyrice-tuzidla>
- [15] GUO, Z., SHAN, Z., LIU, F., DU, D., ZHAO, M. 2020. *Experimental investigation on the performance and mesostructure of multi-material composite 3D-printed sand mold*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 26 No. 2. ISSN: 1355-2546
- [16] CHARKRAVORTY, Diba. 2019. *STL File Format for 3D Printing – Simply Explained*. [online]. [cit. 2021-08-29]. Dostupné z:
<https://all3dp.com/what-is-stl-format-extension-3d-printing/>
- [17] Jatagan.eu. 2021. *Pryskyřice Jatapol WR90N*. [online]. [cit. 2021-08-29]. Dostupné z: <https://www.jatagan.eu/stabilizacni-pryskyrice/>

- [18] KANG, J., SHANGGUAN, H., PENG, F. 2021. *Cooling control for castings by adopting skeletal sand mold design*. China Foundry 18, s. 18–28.
- [19] KTARI, A., EL MANSORI, M. 2020. *Digital twin of functional gating system in 3D printed molds for sand casting using a neural network*. J Intell Manuf.
- [20] Kvs.tul.cz. 2012. *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping: učební text*. [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z:
http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/20Prototyping.pdf
- [21] LYNCH, P., HASBROUCK, C.R., WILCK, J., KAY, M., MANOGHARAN, G. 2020. *Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes: metal casting and additive manufacturing*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 26 No. 6, ISSN: 1355-2546.
- [22] Magazín *Strojírnoství.cz*. 2. ročník 2018 - zvláštní vydání, Brno: Vydavatelství Nová média s.r.o. ISSN 2570-7205.
- [23] MARIEM, B.,S., MOHAMED, E., M. 2021. *Assessment of the effect of 3D printed sand mold thickness on solidification process of AlSi13 casting alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol 114, ISSN:1753-1766.
- [24] MARTINEZ, D., BATE, C., MANOGHARAN, G. 2020. *Towards Functionally Graded Sand Molds for Metal Casting: Engineering Thermo-mechanical Properties Using 3D Sand Printing*. JOM 72, 1340–1354.
- [25] MASTNÝ, G. 2014. *Technologie 3D tisku*. [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z:
<https://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>

- [26] METOS.cz.: metalurgický technicko obchodní servis. 2020. *3D tisk pískových forem a jader: Furanové pryskyřice, Fenolové pryskyřice, Silikáty na bázi vodního skla.* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <http://www.metos.cz/3d.html>
- [27] MITRA, S., MANSORI, M., CASTRO, A.R., COSTIN, M. 2020. *Study of the evolution of transport properties induced by additive processing sand mold using X-ray computed tomography.* Journal of Materials Processing Technology, 277, 116495.
- [28] MUKHTARKHANOV, M, PERVEEN, A, TALAONA D. 2020. *Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting.* Micromachines (Basel).
- [29] NÉEL, T.L., MOGNOL, P., HASCOËT, J. 2018. *Design for Additive Manufacturing: Multi Material Sand Mold.*
- [30] RAMEZANI, D., MANSORI, M. 2020. *Mechanical characterisation of anisotropic silica sand/furan resin compound induced by binder jet 3D additive manufacturing technology.* Ceramics International. Volume 46, Issue 11.
- [31] RODRÍGUEZ - GONZÁLEZ, P., PABLO, E., ROBLES, V., ANA, I., FERMÁNDEZ - ABIA, A., MARÍA, Á., CASTRO - SASTRE,A., JOAQUÍN - BARREIRO,G. 2020. *Feasibility of Calcium Sulfate Moulds Made by Inkjet 3D Printing for Rapid Casting of Aluminium Alloys.* Metals 10, no. 6: 802.
- [32] SAEIDPOUR, M., SVENNINGSSON, R., GOTTHARDSSON, U. 2021. *Thermal Properties of 3D-Printed Sand Molds.* Inter Metalcast.
- [33] SAMA, S., R., MACDONALD, E., VOIGHT, R., MANOGHARAN, G. 2019. *Measurement of Metal Velocity in Sand Casting during Mold Filling.* Metals 9, no. 10: 1079.

- [34] SAMA, S., R., BADAMO, T., MANOGHARAN, G. 2020. *Case Studies on Integrating 3D Sand-Printing Technology into the Production Portfolio of a Sand-Casting Foundry*. Inter Metalcast 14, s. 12–24.
- [35] SANDTEAM.cz. 2015. *Organické pojivové systémy*. [online]. [cit. 2020-01-06].
Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/nase-sluzby/suroviny/organicke-pojivove-systemy/>
- [36] SEDLÁČEK, V. 1979. *Neželezné kovy a slitiny*. 1. vydání, Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury. ISBN 04-414-79.
- [37] SHAH, J. 2020. *Light-Weighting Technologies for High-Performance Ductile Iron Sand Castings*. International Journal of Metalcasting. 14. 656–662. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00423-4>
- [38] SIVARUPAN, T., UPADHYAY, M., ALI, Y., MANSORI, M., DARGUSCH, M. 2019. *Reduced consumption of materials and hazardous chemicals for energy efficient production of metal parts through 3D printing of sand molds*. Journal of Cleaner Production, 224, s. 411-420.
- [39] SNELLING, D., WILLIAMS, CH., DRUSCHITZ, A. 2019. *Mechanical and Material Properties of Castings produced via 3D printed molds*. Additive Manufacturing. 27. s. 199-207.
- [40] SON, H., J., Jang, S., LEE, H., J., YANG, J., J., JEONG, Y., G., BAE, CH., J. 2020. *Mechanical Properties and Reliability of Sand Casting 3D Printing Materials*. Korean Journal of Materials Research. Volume 30 Issue 1. ISSN 2287-7258.
- [41] SPOLCHEMIE.cz. 2021. *Epodur*. [online]. [cit. 2021-08-29]. Dostupné z: <http://www.spolchemie.cz/cs/product.chs-epodur>

- [42] ŠLAJS, J. 2015. *Nové trendy v technologii výroby slévárenských forem*. MM Průmyslové spektrum. Praha: Vogel Publishing. DOI: 1212-2572.
- [43] ŠLAJS, R. 2015. *3D tisk pískových forem a jader: 71. zasedání Odborné komise pro litinu s kuličkovým grafitem*. Chrudim: METOS v.o.s.
- [44] SIVARUPAN, T., MANSORI, M., CONIGLIO, N., DARGUSCH, M. 2020. *Effect of process parameters on flexure strength and gas permeability of 3D printed sand molds*. Journal of Manufacturing Processes. s. 420-437.
- [45] TONDER, M., BEER, D., WICHERS, H. 2020. *A quality assurance framework for sulphonic acid-coated sand used in 3D printing applications*. South African Journal of Industrial Engineering. s. 31.
- [46] TRINOWSKI, D. 2019. *Understanding 3D Sand Printers and Binder Technologies*. FOUNDRY Management and Technology [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.foundrymag.com/moldscores/article/21931923/understanding-3d-sand-printers-and-binder-technologies>
- [47] VETIŠKA, A. 1972. *Teoretické základy slévárenské technologie*. 1. Vydání, Praha: STNL - Státní nakladatelství technické literatury. ISBN 04-221-72.

9 Normy

- [1N] ČSN 04 0000. *Slévárenství. Názvosloví*. Praha: Úřad pro normalizaci, 1972. 144 s.
- [2N] ČSN EN 12890. *Slévárenství - Modely, příslušenství modelů a jaderníky pro výrobu pískových forem a pískových jader*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 32 s.
Třídící znak 04 2001.
- [3N] ČSN 042021. *Slévárenské úkosy modelů a odlitků*. Praha: Úřad pro normalizaci, 1961. 4s.
- [4N] ČSN 72 1078. *Stanovení vyplavitelných látek slévárenských písků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 8s.
- [5N] ČSN 72 1077. *Stanovení hlavních technologických vlastností slévárenských jílových pojiv*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 16 s.
- [6N] ČSN 04 0060. *Slévárenské zařízení. Všeobecné bezpečnostní zásady*. Praha: Český normalizační institut, 1994. 20 s.
- [7N] ČSN 04 2730. *Slévárenská jádrová pojiva. Pevnost v ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1960. 4 s.
- [8N] ČSN 015230. *Stanovení zrnitosti síťovým rozborem*. Praha: Český normalizační institut, 1969.
- [9N] ČSN EN 14617-2. *Umělý kámen – Zkušební metody – Část2: Stanovení pevnosti z ohybu*, Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.12p.



[10N] ČSN EN ISO 8062-3. *Geometrické specifikace produktů (GPS) - Rozměrové a Geometrické tolerance tvarovaných součástí*, Praha: Českým normalizační institut, 2008. 32s.

[11N] ISO 787-5:1980. *Obecné metody zkoušek pigmentů a plniv – Část 5: Stanovení hodnoty absorpce oleje*. Tato norma byla naposledy přezkoumána a potvrzena v roce 2017, proto tato verze zůstává aktuální.

10 Publikační činnost autora

- [1PC] HORÁČEK, L. *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*, MM průmyslové spektrum, 2015, ISSN 1212-2572, dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-technologie-3d-tisku-pisku>
- [2PC] HORÁČEK, L. *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*, Sborník přednášek z 52. slévárenských dnů, 1. vydání, Brno: Česká slévárenská společnost, 2015. ISBN: 978-80-02-02623-5.
- [3PC] PRAŽMA, V., HORÁČEK, L. *Technologie 3D tisku písku v Modelárně LIAZ Liberec*, časopis Slévárenství. 2015, s. 9 - 10, 312 -314. ISSN 0037-6825.
- [4PC] PRAŽMA, V., HORÁČEK, L.. *Technologie 3D tisku písku*, Sborník přednášek 8. odborný seminář Technologie, kvalita a rizika ve výrobě, Jaroměř, 2015, ISBN 978-80-87583-12-8, s. 50,
- [5PC] PRAŽMA, V., HORÁČEK, L. *Modelárna Liaz – sandprint*, Euro, Mladá fronta, Praha, 2016, ISSN: 1212-3129
- [6PC] HORÁČEK, L. *Unikátní technologie sandprint - "3D tisk písku" Lití bez modelového zařízení*, zpravodaj Sdružení automobilového průmyslu, Sdružení automobilového průmyslu – AutoSAP, 2016, ISSN 2570-5482.
- [7PC] HORÁČEK, L.. *Modelárna Liaz Liberec*, Profit, 4/2016, ISSN 1805-2592, s. 18-20
- [8PC] HORÁČEK, L. *Sandprint- realita po 1 roce užívání*, Sborník přednášek 9. odborný seminář Technologie, kvalita a rizika ve výrobě, Jaroměř, 2016, ISBN 978-80-87583-16-6, s. 25 - 28,



- [9PC] VYDRA, P., HORÁČEK, L. *Modelárna Liaz a průmysl 4.0*, API - Akademie produktivity a inovací, s.r.o., 2017, ISSN 1803-5183, dostupné z:
[2 2017 | API Akademie \(e-api.cz\)](#)
- [10PC] HORÁČEK, L. *3D tisk – aditivní technologie*, Sborník přednášek 10. odborný seminář Technologie, kvalita a rizika ve výrobě, Jaroměř 2017, ISBN 978-80-87583-20-3, s. 35,
- [11PC] PRAŽMA, V., VYDRA, P., HORÁČEK, L. *Aditivní technologie pro Průmysl 4.0*, MM průmyslové spektrum, 2018, ISSN 1212-2572, dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-pro-prumysl-4-0>
- [12PC] HORÁČEK, L. *3D tisk v použití ve vývoji*, Konference Materiály a povrchové úpravy, Veletrhy virtuálně, Business Media CZ s. r. o. 2020, Praha.

11 Vyzvané přednášky

- [1VP] Horáček L., *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*,
Článek a přednáška na 52. Slévárenské dny, 10. - 11. 11. 2015, Brno.
- [2VP] Horáček L., *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*,
Fakulta strojní ČVUT v Praze, předmět Automatizace výrobních procesů, letní
semestr r. 2018.
- [3VP] Horáček L., *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*
Fakulta strojní ČVUT v Praze, předmět Automatizace výrobních procesů, letní
semestr r. 2019.
- [4VP] Horáček L., *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*
Fakulta strojní ČVUT v Praze, předmět Automatizace výrobních procesů, letní
semestr r. 2020.
- [5VP] Horáček L., *Unikátní technologie 3D tisku písku v Modelárně Liaz Liberec*
Fakulta strojní ČVUT v Praze, předmět Automatizace výrobních procesů, letní
semestr r. 2021.

12 V a V činnost autora

- [1VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Vynález: *Modelové zařízení a způsob jeho výroby*,
Pražma V., Vydra P., Horáček L., přihl. 27. 10. 2015, CZ 2015-759 A3, zapsáno 10. 5. 2017, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví
Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku
CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293
- [2VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Vynález: *Zástavbový model*
Pražma V., Vydra P., Horáček L., přihl. 5. 8. 2019, CZ 2019-503 A3, zapsáno 17. 2. 2021, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví
Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku
CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293
- [3VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Užitný vzor: *Kontrolní přípravek pro kontrolu zakřivení vnitřního obkladového panelu stropu automobilu*,
Pražma V., Horáček L., přihl. 18. 2. 2015, CZ 29583 U1, zapsáno 28. 6. 2016, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví
Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku
CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293
- [4VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Užitný vzor: *Funkční tvarové díly ve střížných nástrojích*, Pražma V., Vydra P., Horáček L., přihl. 5. 8. 2019, CZ 33699 U1, zapsáno 11. 2. 2020, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví
Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku
CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293
- [5VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Užitný vzor: *Ořezový přípravek*,
Pražma V., Vydra P., Horáček L., přihl. 5. 8. 2019, CZ 33701 U1, zapsáno 11. 2. 2020, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví
Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293

- [6VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Užitený vzor: *Přípravek na svařování výfuku*, Pražma V., Vydra P., Horáček L., Přihl. 15. 8. 2019, CZ 33700 U1, zapsáno 11. 2. 2020, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví

Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293

- [7VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Užitený vzor: *Funkční a pomocná maketa*, Pražma V., Vydra P., Horáček L., Přihl. 5. 8. 2019, CZ 33735 U1, zapsáno 18. 2. 2020, vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví

Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293

- [8VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Ověřená technologie: *Úpravy povrchu 3D tištěných povrchových struktur*, Horáček L., Vydra P., Kadlec M., Antoš P., Pokorný J., Hisem P., Kolář J., zapsáno 30. 6. 2017, Modelárna-Liaz spol. s r.o.

Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293

- [9VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Ověřená technologie: *Zpevňování 3D tištěných pískových tvarů*, Horáček L., Vydra P., Kadlec M., Antoš P., Pokorný J., Hisem P., Kolář J., zapsáno 30. 6. 2017, Modelárna-Liaz spol. s r.o.

Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293

- [10VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Ověřená technologie: *Optimální technologie výroby odlitek do 3D tištěných forem*, Horáček L., Vydra P., Kratochvíl P, zapsáno 21. 12. 2018, Modelárna-Liaz spol. s r.o.

Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293



[11VV] Modelárna-Liaz spol. s r.o., Liberec, CZ, Prototyp: *Prototyp modelového zařízení vyrobený technologií 3D tisku písku*, Horáček L., Vydra P., Kadlec M., zapsáno 29. 6. 2018, Modelárna-Liaz spol. s r.o.

Program APLIKACE – Vyšší inovace využití 3D tisku písku

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0001293

13 Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| <i>Obrázek 1: 3D model kruhu – porovnání CAD a STL dat [10]</i> | 15 |
| <i>Obrázek 2: Schéma datového dělení objektu pro tisk</i> | 17 |
| <i>Obrázek 3: Princip metody Stereolithography a ukázka vytištěného objektu</i> | 18 |
| <i>Obrázek 4: Princip metody Selective Laser Sintering a ukázka vytištěného objektu</i> | 19 |
| <i>Obrázek 5: Princip metody Fused Deposition Modeling a ukázka vytištěného objektu</i> . | 20 |
| <i>Obrázek 6: Princip metody Multi Jet Fusion a ukázka vytištěného objektu</i> | 21 |
| <i>Obrázek 7: Princip metody Material jetting</i> | 22 |
| <i>Obrázek 8: Princip metody Electron Beam Melting a ukázka vytištěného objektu</i> | 23 |
| <i>Obrázek 9: Princip metody Sheet lamination a ukázka vytištěného objektu</i> | 24 |
| <i>Obrázek 10: Graf ukazující poměr počtu sléváren využívajících technologii sandprint</i> .. | 26 |
| <i>Obrázek 11: Rozložení trhu pro slévárenský průmysl [28]</i> | 28 |
| <i>Obrázek 12: Poměr využití aditivních technologií [28]</i> | 29 |
| <i>Obrázek 13: Tiskárna písku S-Max od firmy ExOne [7]</i> | 30 |
| <i>Obrázek 14: Schéma pracoviště pro 3D tisk písku [7]</i> | 30 |
| <i>Obrázek 15: Sandprint – nanesení vrstvy písku s aktivátorem [9]</i> | 32 |
| <i>Obrázek 16: Sandprint – selektivní nanesení binderu pomocí tiskové hlavy s tryskami [9]</i> | 32 |
| <i>Obrázek 17: Sandprint – vytištěná plocha jedné vrstvy písku [9]</i> | 33 |
| <i>Obrázek 18: Sandprint – nanášení další vrstvy písku [9]</i> | 33 |
| <i>Obrázek 19: Sandprint – dokončený tisk [9]</i> | 34 |
| <i>Obrázek 20: Sandprint – vyčištěné díly [9]</i> | 34 |
| <i>Obrázek 21: Sandprint – princip vnikání kapky pojiva mezi zrna písku smíchaného s aktivátorem [8]</i> | 35 |
| <i>Obrázek 22: Polovina pískové formy o rozměrech 600x 300x 250 mm vytištěná technologii sandprint. Jde o formu na odlití hlavy čtyřválcového motoru</i> | 35 |
| <i>Obrázek 23: Testovací tiskové hlavy</i> | 38 |
| <i>Obrázek 24: Závislost ceny na složitosti odlitku [35]</i> | 40 |
| <i>Obrázek 25: Graf ukazující porovnání nákladů v závislosti na množství odlitků vyráběných konvenčně a za pomoci technologie sandprint</i> | 41 |

| | |
|---|----|
| <i>Obrázek 26: Porovnání časů technologické přípravy (TPV) pro konvenční lití a lití do forem vyrobených technologií sandprint</i> | 43 |
| <i>Obrázek 27: Příklad chyby zaviněné špatnou prací s daty</i> | 47 |
| <i>Obrázek 28: Druhý příklad chyby zaviněné špatnou prací s daty.</i> | 47 |
| <i>Obrázek 29: Analýza kapalně fáze taveniny ve formě [8]</i> | 50 |
| <i>Obrázek 30: Flow analýza ukazující rychlost plnění dutiny formy [8]</i> | 50 |
| <i>Obrázek 31: Teplotní pole odlitku [8]</i> | 51 |
| <i>Obrázek 32: Odlitek po vytlačení z formy [8]</i> | 51 |
| <i>Obrázek 33: Porovnání časů plnění formy taveninou při rovném a spirálovém vtokovém kanálu [33]</i> | 52 |
| <i>Obrázek 34: Výsledky softwarové simulace plnění formy a znázornění rychlosti vtékání a času plnění dutiny formy [33]</i> | 53 |
| <i>Obrázek 35: Díl vyrobený klasickou technologií lisováním z plechu [8]</i> | 54 |
| <i>Obrázek 36: Optimalizovaný díl vytvořený jako odlitek s organickou strukturou s vyšší pevností, úspora hmotnosti je 45 % [8]</i> | 54 |
| <i>Obrázek 37: Poměr zastoupení kovů ve slévárenství [34]</i> | 55 |
| <i>Obrázek 38: Simulace plnění formy v počáteční fázi</i> | 56 |
| <i>Obrázek 39: Simulace podpovrchového proudění taveniny</i> | 56 |
| <i>Obrázek 40: Simulace rozložení zahlceného vzduchu v tavenině</i> | 57 |
| <i>Obrázek 41: Predikce času plnění dutiny formy</i> | 57 |
| <i>Obrázek 42: Složená forma s termočládky a 3D model zkušební formy [32]</i> | 59 |
| <i>Obrázek 43: Různá provedení vytištěné formy pro shodný odlitek s různým chlazením [18]</i> | 60 |
| <i>Obrázek 44: Závislost měrné hmotnosti tištěné struktury na tloušťce nanášené vrstvy písku při různém el. napětí napájení tiskové hlavy [5]</i> | 61 |
| <i>Obrázek 45: Graf závislosti pevnosti tištěné pískové struktury na teplotě [40]</i> | 62 |
| <i>Obrázek 46: Graf závislosti nárůstu pevnosti tištěné pískové struktury na čase [40]</i> | 62 |
| <i>Obrázek 47: Graf závislosti pevnosti v ohybu na obsahu aktivátoru v tištěné struktuře [40]</i> | 63 |
| <i>Obrázek 48: Graf závislosti pevnosti v ohybu a hustoty tištěné na obsahu binderu (pojiva) [40]</i> | 63 |
| <i>Obrázek 49: Tepelné pole formy v oblasti pravoúhlého vtoku [29]</i> | 64 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 50: Model pro zkoušku lití žeber | 69 |
| Obrázek 51: Model pro zkoušku lití drážek | 70 |
| Obrázek 52: Model pro zkoušku lití výstupků | 70 |
| Obrázek 53: Model pro zkoušku lití otvorů | 71 |
| Obrázek 54: Odlitek orientovaný detaily nahoru | 72 |
| Obrázek 55: Odlitek orientovaný detaily dolů | 72 |
| Obrázek 56: Polohy lití zkušebních vzorků | 73 |
| Obrázek 57: Vzorek pro zkoušku pevnosti v tahu | 76 |
| Obrázek 58: Vzorek pro zkoušku pevnosti v tlaku | 76 |
| Obrázek 59: Vzorek pro zkoušku pevnosti v ohybu | 77 |
| Obrázek 60: Vytisknuté formy se zbytky nevytvrzeného písku sloužící jako podpora | 79 |
| Obrázek 61: Problematické detaily forem, poškození při čištění od písku, špatně přístupná místa | 80 |
| Obrázek 62: Lepidlo Klebepaste SB od firmy Hüttenes- Albertus | 81 |
| Obrázek 63: Testovací formy po odlití | 81 |
| Obrázek 64: Ukázka povrchu odlitku, který velmi dobře kopíruje tištěnou strukturu pískové formy | 82 |
| Obrázek 65: Odlitky vzorků s žebry | 83 |
| Obrázek 66: Odlitky vzorků s drážkami | 84 |
| Obrázek 67: Odlitky vzorků s výstupky | 85 |
| Obrázek 68: Odlitky vzorků s otvory | 86 |
| Obrázek 69: První foto z termokamery – teplotní pole odlitků | 87 |
| Obrázek 70: Druhé foto z termokamery – teplotní pole odlitků | 87 |
| Obrázek 71: Spektrometr Philips PW1404 | 90 |
| Obrázek 72: Přístroj Masterziser 2000 | 92 |
| Obrázek 73: Graf ukazuje závislost množství zrn písku v % na jejich velikosti v μm | 93 |
| Obrázek 74: Tvar a velikost zrn písku FS 003 – zvětšeno 10x | 93 |
| Obrázek 75: Tvar a velikost zrn písku FS 003 – zvětšeno 160x | 94 |
| Obrázek 76: Graf závislosti pevnosti vzorků na čase (každé číslo vzorku odpovídá časovému úseku 5 minut) | 95 |
| Obrázek 77: Vytisknuté a očištěné zkušební vzorky | 96 |
| Obrázek 78: Zkušební přístroj Instron, vpravo je s instalovanou tepelnou komorou | 99 |

| | |
|---|-----|
| <i>Obrázek 79: Zkušební vzorek v kelímku s pryskyřicí při zkoušce vztlínivosti a prosycení</i> | 101 |
| <i>Obrázek 80: Nasycený vzorek po rozříznutí</i> | 102 |
| <i>Obrázek 81: Nasycené vzorky</i> | 103 |
| <i>Obrázek 82: Lom tyčinkou s nedostatečným prosycením, uprostřed je místo bez pryskyřice</i> | 104 |
| <i>Obrázek 83: Lom tyčinkou s dostatečným prosycením</i> | 104 |
| <i>Obrázek 84: Tištěná struktura – a) nenasycená, b) nasycená</i> | 106 |
| <i>Obrázek 85: Graf závislosti viskozity etanolu na teplotě</i> | 106 |
| <i>Obrázek 86: Rozložený upínací přípravek včetně zkušební tyčinky</i> | 108 |
| <i>Obrázek 87: Snímací body nalepené na zkušební tyčince</i> | 109 |
| <i>Obrázek 88: Uspořádání zkoušky tahem. Optický snímač a tyčinka upnutá ve zkušebním přístroji</i> | 109 |
| <i>Obrázek 89: Zkušební tyčinka po testu</i> | 110 |
| <i>Obrázek 90: Graf závislosti tahového napětí na tahové deformaci při tahové zkoušce</i> | 111 |
| <i>Obrázek 91: Graf závislosti zatížení na protažení</i> | 111 |
| <i>Obrázek 92: Snímací body nalepené na zkušebním válečku válečku</i> | 113 |
| <i>Obrázek 93: Uspořádání zkoušky v tlaku, optický snímač a tyčinka upnutá ve zkušebním přístroji</i> | 113 |
| <i>Obrázek 94: Struktura lomu napuštěného zkušební vzorku (pryskyřice Epodur 498)</i> | 114 |
| <i>Obrázek 95: Struktura lomu napuštěného zkušební vzorku (pryskyřice WR 90N)</i> ... | 114 |
| <i>Obrázek 96: Struktura lomu napuštěného zkušební vzorku (pryskyřice LG 735 Aero)</i> | 115 |
| <i>Obrázek 97: Struktura lomu napuštěného zkušební vzorku (pryskyřice Epolam 5015)</i> | 115 |
| <i>Obrázek 98: Graf závislosti tlakového napětí na deformaci</i> | 116 |
| <i>Obrázek 99: Graf závislost zatížení na posuvu příčnicku</i> | 117 |
| <i>Obrázek 100: Přípravek na zkoušku v ohybu včetně zkušební tyčinky s nalepenými body</i> | 118 |

| | |
|---|-----|
| <i>Obrázek 101: Uspořádání ohybové zkoušky, optický snímač a tyčinka položená ve zkušebním přípravku</i> | 119 |
| <i>Obrázek 102: Vzorek po ohybové zkoušce</i> | 119 |
| <i>Obrázek 103: Graf závislosti ohybového napětí na ohybové deformaci</i> | 120 |
| <i>Obrázek 104: Graf závislosti zatížení na průhybu</i> | 121 |
| <i>Obrázek 105: Zkušební vzorek pro měření teplotní roztažnosti s nalepenými měřicími body</i> | 122 |
| <i>Obrázek 106: Měření teplotní dilatace pomocí video – extenzometru</i> | 123 |
| <i>Obrázek 107: Rozpadající se zkušební vzorky v peci při teplotě 1 000 °C</i> | 125 |
| <i>Obrázek 108: Schodovitý povrch formy a nominální rozměr odlitku</i> | 128 |
| <i>Obrázek 109: Schodovitá struktura povrchu tištěné pískové struktury</i> | 128 |
| <i>Obrázek 110: Svařovací přípravek vyrobený technologií sandpint svařencem kolena výfuku</i> | 129 |
| <i>Obrázek 111: Svařovací přípravek vyrobený technologií sandpint svařencem tlumiče výfuku</i> | 129 |
| <i>Obrázek 112: Přípravek pro měření tvaru skla</i> | 130 |
| <i>Obrázek 113: Přípravek na dochlazování</i> | 131 |
| <i>Obrázek 114: Kompozitový díl vyrobený za pomoci nevyztuženého modelu</i> | 132 |
| <i>Obrázek 115: Laminovací forma na výrobu kapotáže vrtulníku vyrobená technologií sandprint (vlevo) a vyrobený kompozitní díl (vpravo)</i> | 133 |
| <i>Obrázek 116: Vytištěný formovací model při výrobě pískové licí formy</i> | 133 |
| <i>Obrázek 117: Designová maketa kapotáže vrtulníku vyrobená technologií sandprint</i> | 134 |
| <i>Obrázek 118: Maketa kapotáže SS151 vyrobená technologií sandprint určená pro test v aerodynamickém tunelu</i> | 134 |
| <i>Obrázek 119: SkySpotter SS151 – bezpilotní vrtulník</i> | 140 |

14 Seznam tabulek

| | |
|--|------------|
| <i>Tabulka 1: Počet tiskáren v jednotlivých zemích</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabulka 2: Chemická analýza písku FS003.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Tabulka 3: Mísící poměry složek pro tiskárnu S - Max.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabulka 4: Porovnání cen výroby odlitků konvenční technologií a pomocí sandprintu..</i> | <i>44</i> |
| <i>Tabulka 5: Porovnání nákladů va TPVpro různá množství odlitků vyráběných konvenčně a za pomocí 3D tisku</i> | <i>44</i> |
| <i>Tabulka 6: Požadované vlastností materiálů na výrobky firmy Modelárna-Liaz.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabulka 7: Chemické složení Al slitiny AlSi10Mg [datasheet AlSi10Mg,]</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabulka 8: Technické parametry lití do vytištěných forem z tiskárny S-Max od firmy ExOne</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabulka 9: Hodnoty doporučeného dávkování pojiva a aktivátoru.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Tabulka 10: Výsledky chemické analýzy písku FS 003</i> | <i>91</i> |
| <i>Tabulka 11: Výsledky morforlogie písku SF 003.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Tabulka 12: Výsledky zkoušky vaznosti.....</i> | <i>95</i> |
| <i>Tabulka 13: Parametry zkušebního přístroje Instron 3369.....</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabulka 14: Výšky nasycení vzorků v různých pryskyřicích</i> | <i>101</i> |
| <i>Tabulka 15: Měření objemu pórů v tištěné struktuře</i> | <i>107</i> |
| <i>Tabulka 16: Parametry zkoušky tahem</i> | <i>108</i> |
| <i>Tabulka 17: Výsledky měření zkoušky pevnosti v tahu</i> | <i>110</i> |
| <i>Tabulka 18: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabulka 19: Parametry zkoušky v tlaku</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabulka 20: Výsledky zkoušky měření pevnosti v tlaku</i> | <i>116</i> |
| <i>Tabulka 21: Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku</i> | <i>117</i> |
| <i>Tabulka 22: Parametry zkoušky ohybem</i> | <i>118</i> |
| <i>Tabulka 23: Výsledky měření zkoušky pevnosti v ohybu.....</i> | <i>120</i> |
| <i>Tabulka 24: Výsledky měření zkoušky pevnosti v ohybu.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Tabulka 25: Parametry zkoušky teplotní roztažnosti.....</i> | <i>122</i> |
| <i>Tabulka 26: Průměrné hodnoty koeficientu roztažnosti.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Tabulka 27: Výsledky zkoušky teplotní odolnosti vzorků</i> | <i>125</i> |
| <i>Tabulka 28: Průměrné hodnoty teplotní odolnosti</i> | <i>125</i> |



*Tabulka 29: Porovnání vlastností tištěných struktur v různých úpravách
a s běžnými konstrukčními materiály..... 126*

Tabulka 30: Označené výrobky, které se vyrobily a testovaly 127



15 Seznam příloh

[1P] Ověřená technologie úpravy povrchu 3D tištěných povrchových struktur

[2P] Ověřená technologie výroby odlitků do 3D tištěných forem

[3P] Ověřená technologie zpevňování 3D tištěných pískových tvarů

[4P] Prototyp modelového zařízení