

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

Teze disertační práce

Ing. Libor Horáček

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Rapid prototyping – využití technologie sandprint

Ing. Libor Horáček

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: *doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Leden 2022

Název anglicky: Rapid prototyping – use of technology sandprint

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Libor Horáček

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, 166 07, Praha 6

Oponenti: prof. Ing. Iva Nová, CSc.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	10
3. METODY ZPRACOVÁNÍ	11
4. VÝSLEDKY	13
5. ZÁVĚR	15
6. PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTACE	16
7. V a V ČINNOST AUTORA	17
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZÍCH	20
9. ANOTACE.....	22
10. SUMMARY	23
11. BEZ OHLASŮ A RECENZÍ.....	24

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

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. Postupně bylo vyvinuto 7 základních typů 3D tisku. [8 - 11, 20, 1 – 6 PC]

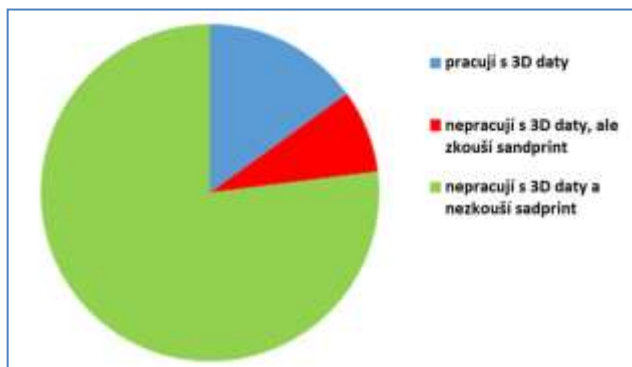
Situace ve slévárnictví a 3D tisku písku v průmyslu

Nejméně rozšířenou technologií 3D tisku je písku zvaný též Sandprint. Jde o variantu technologie Multi Jet Fusion určenou primárně pro tisk prototypových a malosériových slévárenských forem.

První zařízení pro Sandprint v Evropě bylo vyvinuto v Mnichově v roce 1995.

V České republice jsou pouze dvě tiskárny pro tisk z písku. Jedna z nich je ve firmě Modelárna – Liaz (ML). [1 - 3, 7PC - 8 PC]

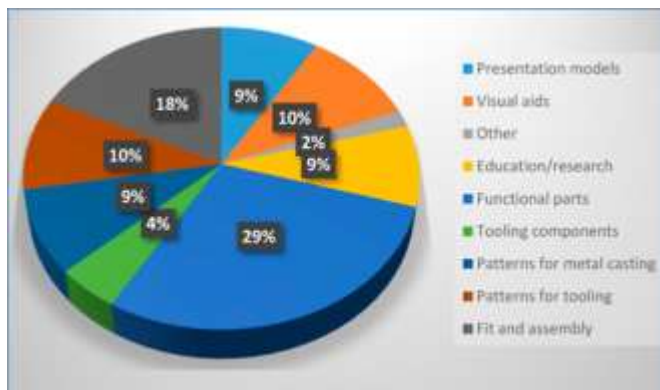
Podle průzkumu provedeného firmou ML ve spolupráci s firmou ExOne ve slévárnách v České republice, Německu, Rakousku a Polsku se ukázalo, že povědomí o sandrintu je velice malé. Většina sléváren investovala do technologie přípravy taveniny, lití a kontroly odlitků, ale není ani vybavena na práci s 3D daty. [4, 5, 9PC]



Obrázek 1. Graf poměru sléváren pracujících s 3D daty

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

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



Obrázek 2. Graf poměru využití aditivních technologií

Z obrázku x jsou patrné dvě důležité informace:

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

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. Výhodou sandprint technologie je, že není ovlivněna tvarovou složitostí výrobků. [12, 19]

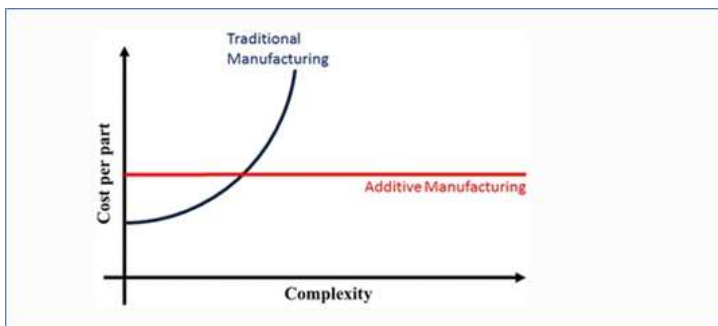


Obrázek 3. Polovina pískové formy vytištěná technologií sandprint.

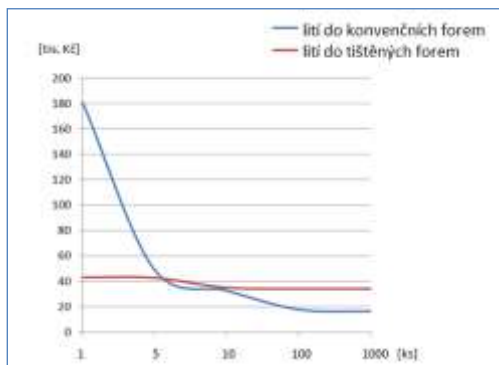
Problematika použití technologie sandprint ve slévárství

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 nastavení tiskárny a základních vlastnostech tištěné struktury. [16, 10PC]

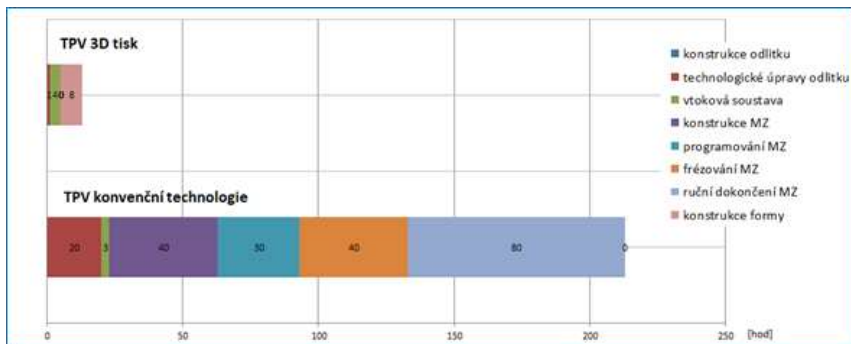
Byla provedena rešerše z hlediska ekonomického i technického.



Obrázek 4..Graf porovnání závislosti ceny na složitosti odlitků u konvenční a sandprint technologie



Obrázek 5..Graf porovnání závislosti ceny na množství odlitků u konvenční a sandprint technologie



Obrázek 6. Graf porovnání doby technické přípravy výroby u konvenční a sandprint technologie

Z obrázku 6 je vidět značná časová úspora při použití technologie sandprint.

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 žebér. 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.[11, 12, 16, 17]

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

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

Dílčí cíle práce:

- 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
- provést analýzu tištěné pískové struktury a prozkoumat možnosti jejich 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

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

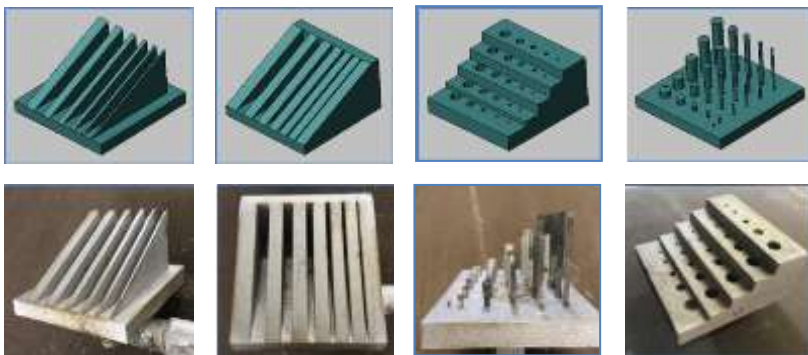
Předmětem výzkumu bylo zjistit co nejvíce možností využití technologie sandprint, a to jak při samotném procesu v technologiích slévání, respektive odlévání složitých tvarů z kovu do tištěných pískových forem, tak při dalším využití tvarové neomezenosti tisku v dalších technologických i technických aplikacích.

Byly navrženy a provedeny následující experimenty, pro získání informací a zmapování 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. [15, 17]

Jako nejvíce problémové se pro odlévání jeví následující tvary:

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



Obrázek 7. 3D modely a odlitky testovacích vzorků.

- 2) Provedení analýzy a zkoušky skutečných parametrů tištěné struktury. Zkoušky následných úprav tištěné pískové struktury a zkoušky pro stanovení mechanických vlastností po úpravě. [13, 14, 18]

Byla provedena série mechanických, tepelných a chemických zkoušek a byly podrobně popsány vlastnosti tištěné struktury. Dále byly

stanoveny postupy pro úpravy a metody pro kontrolu úprav tištěné struktury.



Obrázek 8. zkoušky pevnosti upravených a neupravených vzorků tištěných struktur

Tabulka 1. zkoušky pevnosti upravených a neupravených vzorků tištěných struktur

typ pryskyřice	průměrná hodnota pevnosti v tahu [MPa]	typ pryskyřice	průměrná hodnota pevnosti v tahu [MPa]	typ pryskyřice	průměrná hodnota pevnosti v tahu [MPa]
bez vycení	11,1	bez vycení	4,8	bez vycení	1,0
Jetapol WR 90N	10,8	Jetapol WR 90N	25,1	Jetapol WR 90N	11,5
Epolem 5015	21,2	Epolem 5015	12,4	Epolem 5015	30,0
LG 735 Aero	20,6	LG 735 Aero	54,0	LG 735 Aero	29,7
CHS Epodur 498 - 1667	24,0	CHS Epodur 498 - 1667	25,3	CHS Epodur 498 - 1667	28,7

Z tabulky 1 je možné vidět, že výsledkem úprav je navýšení mechanické pevnosti v řádech stovek až tisíců %.

- 3) Určení možnosti použití pro výrobu funkčních dílů pro strojírenství a realizovat výrobu jejich představitelů.

Úpravou tištěné struktury napouštěním vznikl nový materiál s novými parametry. 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. [6]

Byly porovnány vlastnosti pískového kompozitu s ostatními materiály používanými ve strojírenství. Na základě porovnání byly vytipovány strojní součásti a ty byly vyrobeny z pískového kompozitu technologií sandprint a podrobeny testům.

4. VÝSLEDKY

Cíl 1 bylo nalezení krajních možností vytištěné pískové struktury technologií sandprint při použití ve slévárenství. 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. 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*. [7, 1VV, 10VV]

Cíl 2 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.

Byla provedena patentová řešerše.

Na základě experimentů vznikly následující publikace:

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

Cíl 3 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. [11PC]

Jednalo se o následující výrobky:

- Svařovací přípravek [6VV]
- Měřicí přípravek [3VV]
- Dochlazovací přípravek [4VV, 5VV]
- Laminovací přípravek [1VV]

- Modelové zařízení pro výrobu pískových forem [1VV, 11VV]
- Designová maketa [2VV, 7VV]
- Maketa do aerodynamického tunelu [2VV, 7VV]



Obrázek 9. ukázka dílu přípravky vyrobeného technologií sandprint

5. ZÁVĚR

Práce ukazuje, že nová technologie sandprint i nově vyvinutý materiál *pískový kompozit* 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 ".

6. PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM

DISERTACE

- [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 Slévárnství. 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.. *Modelárna Liaz Liberec*, Profit, 4/2016, ISSN 1805-2592, s. 18-20
- [7PC] 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,
- [8PC] 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 \(e-api.cz\)](https://www.e-api.cz)

- [9PC] 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,
- [10PC] 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>
- [11PC] HORÁČEK, L. *3D tisk v použití ve vývoji*, Konference Materiály a povrchové úpravy, Veletrhy virtuálně, Business Media CZ s. r. o. 2020, Praha.

7. 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, Užitečný 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, Užitiný 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, Užitiný 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, Užitiný 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, Užitiný 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

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZÍCH

- [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/>
- [2] BABAK, K. 2016. *Wohlers report 3D printing and additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates. ISBN 978-0-9913332-2-6.
- [3] ExOne. *S-Max Furan – Digital Core Production*. 2014. Augsburg.
- [4] ExOne. *Corporate Slides World Overview Update*. Prezentace firmy ExOne pro rok 2021, vyžádaný Email od firmy ExOne
- [5] 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/>
- [6] GRM-systems.cz. 2021. *Pryskyřice a tužidla*. [online]. [cit. 2021-08-29]. Dostupné z: <http://grm-systems.cz/pryskyrice-tuzidla>
- [7] KANG, J., SHANGGUAN, H., PENG, F. 2021. *Cooling control for castings by adopting skeletal sand mold design*. China Foundry 18, s. 18–28.
- [8] 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
- [9] Magazín *Strojírenství.cz*. 2. ročník 2018 - zvláštní vydání, Brno: Vydavatelství Nová média s.r.o. ISSN 2570-7205.
- [10] MASTNÝ, G. 2014. *Technologie 3D tisku*. [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>

- [11] MUKHTARKHANOV, M, PERVEEN, A, TALAONA D. 2020. *Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting*. Micromachines (Basel).
- [12] NÉEL, T.L., MOGNOL, P., HASCOËT, J. 2018. *Design for Additive Manufacturing: Multi Material Sand Mold*.
- [13] RAMEZANI, D., MANSORI, M. 2020. *Mechanical characterisation of anisotropic silica sand/furan resin compound induced by binder jet 3D 13additive manufacturing technology*. Ceramics International. Volume 46, Issue 11.
- [14] SAEIDPOUR, M., SVENNINGSSON, R., GOTTHARDSSON, U. 2021. *Thermal Properties of 3D-Printed Sand Molds*. Inter Metalcast.
- [15] SEDLÁČEK, V. 1979. *Neželezné kovy a slitiny*. 1. vydání, Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury. ISBN 04-414-79.
- [16] 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>
- [17] SNELLING, D., WILLIAMS, CH., DRUSCHITZ, A. 2019. *Mechanical and Material Properties of Castings produced via 3D printed molds*. Additive Manufacturing. 27. s. 199-207.
- [18] SPOLCHEMIE.cz. 2021. *Epodur*. [online]. [cit. 2021-08-29]. Dostupné z: <http://www.spolchemie.cz/cs/product.chs-epodur>
- [19] ŠLAJS, R. 2015. *3D tisk pískových forem a jader: 71. zasedání Odborné komise pro litinu s kuličkovým grafitem*. Chrudim: METOS v.o.s.
- [20] 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>

9. ANOTACE

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 byly testovací formy pro testování 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.

10.SUMMARY

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.

11.BEZ OHLASŮ A RECENZÍ