



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**VYUŽITÍ 3D TISKU K PŘÍPRAVĚ
POKROČILÝCH KERAMICKÝCH
MATERIÁLŮ**

APPLICATION OF 3D PRINTING FOR PREPARATION OF ADVANCED CERAMIC
MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Klusáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Salamon, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Martin Klusáček
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. David Salamon, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Využití 3D tisku k přípravě pokročilých keramických materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pokročilé keramické materiály patří mezi nejtvrdší materiály na Zemi a mají schopnost vydržet extrémní teploty. Mechanické vlastnosti jako ořezová síla nebo kompresní pevnost mohou být rovněž excelentní a řádově převyšovat kovy nebo plasty. Příprava komplexních tvarů z keramických materiálů je však často velmi složitá a drahá. V poslední době se s rozvojem 3D tisku naskytly nové možnosti tvarování keramických materiálů. Oxid hlinitý byl v této práci zvolen jako základní materiál pro praktické ověření možností tvarování komerčně dostupnou 3D tiskárnou.

Cíle bakalářské práce:

1. Literární rešerše použití 3D tiskáren pro tvarování pokročilých keramických materiálů.
2. Ověření možností tvarování oxidu hlinitého pomocí komerčně dostupné 3D tiskárny.

Seznam doporučené literatury:

Zocca, A., P. Colombo, C. M. Gomes and J. Günster. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities, J. Am. Ceram. Soc., 98 (2015) 1983-2001.

Deckers, J., J. Vleugels and J.P. Kruthl. Additive Manufacturing of Ceramics: A Review, J Ceram Sci Technol, 5 (2014) 245-260.

Evans, J. R. G. Seventy ways to make ceramics, J. Eur. Ceram. Soc., 28 (2008) 1421-1432.

Utela, B., D. Storti, R. Anderson and M. Ganter. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP), Journal of Manufacturing Processes, 10 (2008) 96-104.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

V této závěrečné práci jsou shrnuty hlavní metody 3D tisku sloužící ke tvarování pokročilé keramiky, vzájemné srovnání a zmínění jejich předností a nevýhod. V experimentální části byly připraveny dva druhy keramických suspenzí, které byly použity k ověřování možnosti využití komerčně dostupné 3D tiskárny k automatizovanému odlévání do silikonových forem a k přímému tisku 2D tvaru. Následně byly analyzovány výsledky na základě reprodukovatelnosti metody a relativních hustot vzorků. Z hlediska hmotností jednotlivých odlitků bylo dosaženo přesnosti 5,3 % a bylo zjištěno, že lze dosáhnout relativní hustoty vzorků přes 98 % s přesností 1 %.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, oxid hlinitý, pokročilá keramika

ABSTRACT

In this bachelor thesis there are summarized main 3D printing methods of advanced ceramics. They are compared and their advantages and disadvantages are mentioned. In experimental part of this thesis two different ceramic suspensions were prepared and used for automated silicon form casting and direct 3D printing with financially available 3D printer. The analysis of results was based on reproducibility of the method and sample relative density. The mass accuracy of 5,3 % was reached. It was found out, that the relative density of samples over 98 % can be achieved with accuracy of 1 %.

KEY WORDS

3D printing, aluminium oxide, advanced ceramics

KLUSÁČEK, M. *Využití 3D tisku k přípravě pokročilých keramických materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Salamon, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FSI VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Davidu Salamonovi, Ph.D., za odborné vedení, vstřícný přístup a poskytování rad a připomínek během psaní práce. Děkuji také panu Ing. Jakubu Rolečkovi za ochotu a pomoc při řešení experimentální části.

Obsah

1. Úvod	11
2. Cíle práce	12
3. Teoretická část	13
3.1 Metody 3D tisku	13
3.1.1 Úvod.....	13
3.1.2 Přímé metody 3D tisku	13
3.1.3 Nepřímé metody 3D tisku	17
3.1.4 Shrnutí.....	19
3.2 Slinování keramiky.....	20
3.3 Hodnocení přesnosti odlitků	22
4. Experimentální část	24
4.1 Použité materiály	24
4.2 Připravené suspenze.....	24
4.3 Použitá 3D tiskárna.....	25
4.4 Sušení a odstranění organických složek	28
4.5 Slinování	28
4.6 Měření hmotnosti a hustoty.....	29
4.7 Hodnocení přesnosti metody.....	29
5. Výsledky a diskuze.....	31
5.1 Režim A – odlévání	31
5.2 Režim B – přímý tisk.....	37
6. Závěr.....	39
7. Seznam použitých zdrojů.....	40
8. Seznam obrázků	42
9. Seznam tabulek a grafů.....	43
10. Seznam příloh.....	44
11. Přílohy.....	45

1. Úvod

Pojem keramika zahrnuje široké spektrum materiálů. Existuje několik definic keramiky. Jednoduše ji však můžeme považovat za anorganickou, nekovovou tuhou látku, připravenou z práškových materiálů působením tepla. Keramické materiály můžeme dále rozdělit do dvou základních skupin: tradiční a pokročilá keramika. Kořeny tradiční keramiky sahají až do nejstarších civilizací. Tento typ zahrnuje výrobky připravené z přírodních surovin. Produkty tudíž obsahují velký podíl nečistot. Patří mezi ně např. dlaždice, cihly, porcelán, skla, sanitární keramika,... Na rozdíl od tradiční keramiky je ta pokročilá vyráběna z chemicky čistých práškových surovin. Od toho se odvíjí její cena, která je nesrovnatelně vyšší. Vyznačuje se ovšem i unikátními mechanickými vlastnostmi.[1]

Obecně mezi vlastnosti keramických materiálů patří vysoká pevnost, tvrdost, nízká elektrická a tepelná vodivost a třeba odolnost vůči velmi vysokým teplotám. Na druhou stranu se u keramiky setkáme s křehkostí a s ní související nízkou elasticitou.[2]

Vysoká tvrdost je způsobena pevnými vazbami mezi částicemi materiálu a omezeným pohybem dislokací. Podle Mohsovy stupnice vrypové tvrdosti patří keramika mezi nejtvrďší materiály. S ní však souvisí vyšší náklady na opracování těchto výrobků. K obrábění jsou konveční nástroje nevyhovující. Nutné použití nástrojů diamantových se výrazně odráží na ceně.

Jedno z možných řešení relativně drahého obrábění keramiky je 3D tisk jejího konečného tvaru. Otevírají se tak nové možnosti v oblasti tvarování pokročilé keramiky.

2. Cíle práce

Pokročilé keramické materiály patří mezi nejtvrdší materiály na Zemi a mají schopnost vydržet extrémní teploty. Mechanické vlastnosti jako otěruvzdornost nebo kompresní pevnost mohou být rovněž excelentní a řádově převyšovat kovy nebo plasty. Příprava komplexních tvarů z keramických materiálů je však často velmi složitá a drahá. V poslední době se s rozvojem 3D tisku naskytly nové možnosti tvarování keramických materiálů. Oxid hlinitý byl v této práci zvolen jako základní materiál pro praktické ověření možností tvarování komerčně dostupnou 3D tiskárnou.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí:

1. Literární rešerše použití 3D tiskáren pro tvarování pokročilých keramických materiálů.
2. Ověření možností tvarování oxidu hlinitého pomocí komerčně dostupné 3D tiskárny.

3. Teoretická část

3.1 Metody 3D tisku

3.1.1 Úvod

Aditivní výroba, také nazývaná jako solid freeforming fabrication, rapid prototyping nebo 3D printing zahrnuje typ technologií, které výrobek generují přímo z virtuálního modelu na základě přidávání materiálu vrstvu po vrstvě. Materiál je přiváděn do procesu zpravidla ve formě prášku/granulátu, pasty nebo suspenze. Takto je možné vyrábět součásti z polymerů, kovových materiálů a keramiky. U výrobků z více druhů materiálu lze tyto materiály přivádět do procesu výroby kontinuálně.[3, 4]

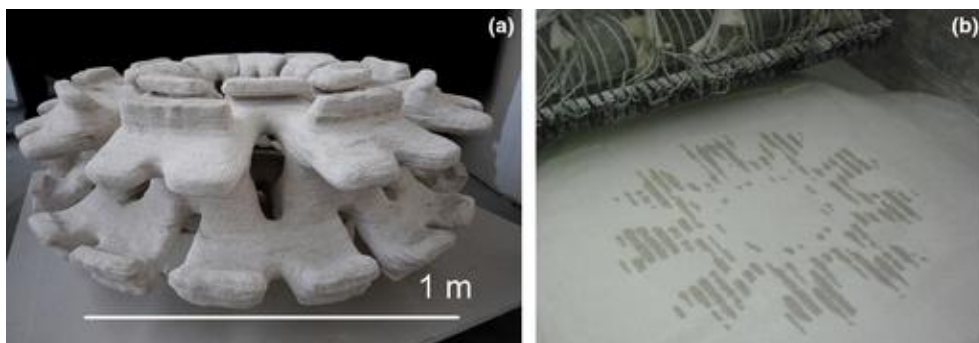
Tyto technologie výroby lze rozdělit do dvou základních skupin – přímé a nepřímé. U přímých metod je tvar, který dostaneme určitou výrobní metodou, konečný. Naopak u metod nepřímých dostaneme pomocí 3D tisku tvar "opačný" tvaru konečnému. Z toho se odvíjí různé výhody a možnosti aplikací u jednotlivých metod.

3.1.2 Přímé metody 3D tisku

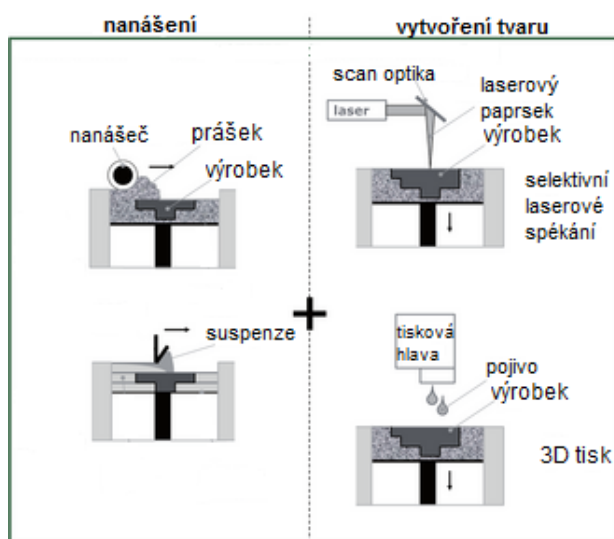
Powder based 3D printing – 3D tisk z prášku

U této metody se pevné struktury dosahuje postupným nanášením tekutého prášku vrstvu po vrstvě. Jednotlivé vrstvy se selektivním způsobem zhutňují nebo slepují, dokud se nedocílí konečného tvaru objektu. Informace o dané vrstvě se získává z virtuálního 3D modelu, který je speciálním softwarem rozdělen do jednotlivých vrstev. Odlišujeme dva základní druhy spojování vrstev. Jsou to: 3D tisk (three-dimensional printing) a selektivní laserové spékání (SLS = selective laser sintering). U 3D tisku se používá tisková hlava, která postupně nanáší malé dávky pojiva, což vede ke spojení vrstev. V případě selektivního spékání pohlcuje prášková vrstva energii dopadajícího laserového paprsku. Dochází pak ke spékání nad sebou ležících vrstev. Po dokončení tisku se objekt jednoduše vyjme z práškového podkladu a očistí.[3]

Příklad výrobku, vyrobeného touto metodou, je na *obr. 1*. Na *obr. 2*. je schematicky znázorněn postup metody.



Obrázek 1. a) umělecký model "květiny" zhotovený pomocí 3D tisku z prášku; b) fotografie jedné vrstvy během procesu.[3]



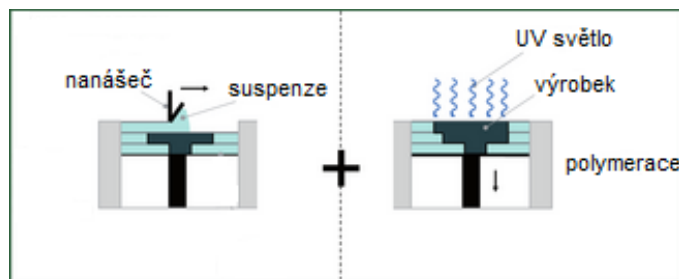
Obrázek 2. Postup metody 3D tisku z prášku.[3]

Stereolitografie

Tato technika je založena na fotopolymeraci kapalné pryskyřice naplněné částicemi keramického materiálu. Provádí se způsobem vrstva po vrstvě podobně jako u ostatních metod nepřímé aditivní výroby.[3] Typická suspenze sestává z monomerní sloučeniny, fotoiniciátoru a přísad pro disperzi keramického prášku (jeho koncentrace se pohybuje nejčastěji mezi 40-60 obj.%).[5]

Během tohoto procesu jsou jednotlivé vrstvy suspenze skenovány paprsky UV záření. Toto záření způsobuje chemickou reakci, která vede k polymerizaci (viz obr. 3). Po odstranění pojiva a následném spékání v peci vzniká konečný keramický díl.[4]

U 3D tisku z prášku poskytuje tuhé prostředí zároveň i podpěru. Při stereolitografii použitou suspenzi k této funkci využít nelze, jelikož je tekutá. Proto se současně s objektem staví i podpěrné struktury, které se po dokončení procesu odstraní.[6]

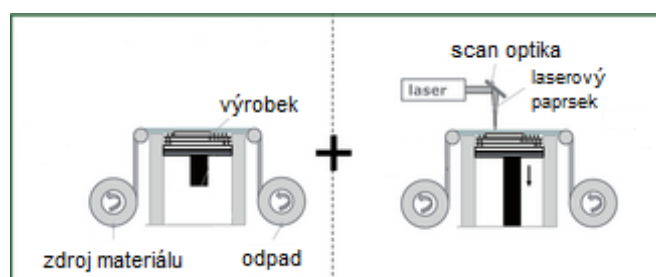


Obrázek 3. Postup metody stereolitografie.[3]

Laminated object manufacturing

Metoda využívá k sestavení 3D objektu tenké pláty (viz obr. 4), které na rozdíl od předchozích způsobů nejsou vystavovány velkému tlaku ani teplotě. Hlavní výhodou této techniky možnost výroby vrstvených materiálů přímo z "green tapes", které jsou vytvarovány například pomocí extruze nebo tape castingu. Z důvodu malé tloušťky jednotlivých plátů není potřeba tak vysoká teplota spékání jako u SLS, což zabraňuje i delaminaci způsobené nehomogenním tlakem uvnitř objemnějších tvarů.

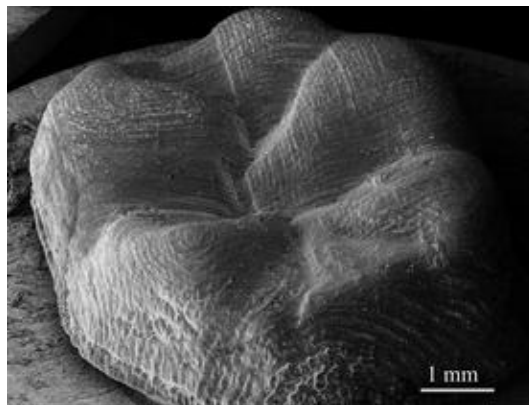
Tento způsob ale doprovází i nevýhody. Z procesu výroby vyplývá, že výsledný materiál bude mít relativně vysokou porozitu a střední pevnost v ohybu. Výsledek je také spojen s kvalitou rozhraní mezi pláty a přítomností defektů na těchto spojích.[3]



Obrázek 4. Postup metody LOM.[3]

Direct inkjet printing – DIP

Tato technologie využívá ke zhotovení součástí keramickou suspenzi, která je tiskovou hlavou dávkovaná po velmi malých kapkách (viz *obr. 6*). Keramická suspenze obsahuje keramické částice (nejčastěji < 30 obj.%) rozptýlené v kapalném médiu. Toto médium obsahuje aditiva ke stabilizaci suspenze, zvýšení viskozity a povrchového napětí. Aby suspenze bez problému mohla procházet skrz trysku tiskové hlavy, je potřeba, aby částice suspenze byly dostatečně malé. Velikosti částic jsou menší než 1 μm. Díky malým objemům jednotlivých kapek suspenze (v řádech pikolitřů) lze dosáhnout vysokých křivostí povrchů výrobku (viz *obr. 5*). Po nanesení suspenze vyschne a zhutní se, pak následuje klasické slinování keramiky v peci.[3]



Obrázek 5. SEM snímek povrchu zubní korunky zhotovené pomocí DIP.[3]

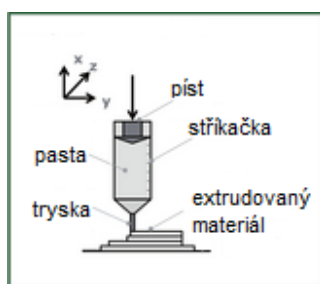


Obrázek 6. Postup metody DIP.[3]

Robocasting

Jedná se v dnešní době o nejvyužívanější technologii pro výrobu porézních struktur. Tato metoda zahrnuje souvislou extruzi suspenze pomocí tiskové hlavy (viz *obr. 7*). Základem je kontrola chování suspenze po opuštění trysky – rozhodující jsou optimální reologické vlastnosti suspenze (filamentu). Důležité je, aby se extrudovaná část nedeformovala a neprohýbala.

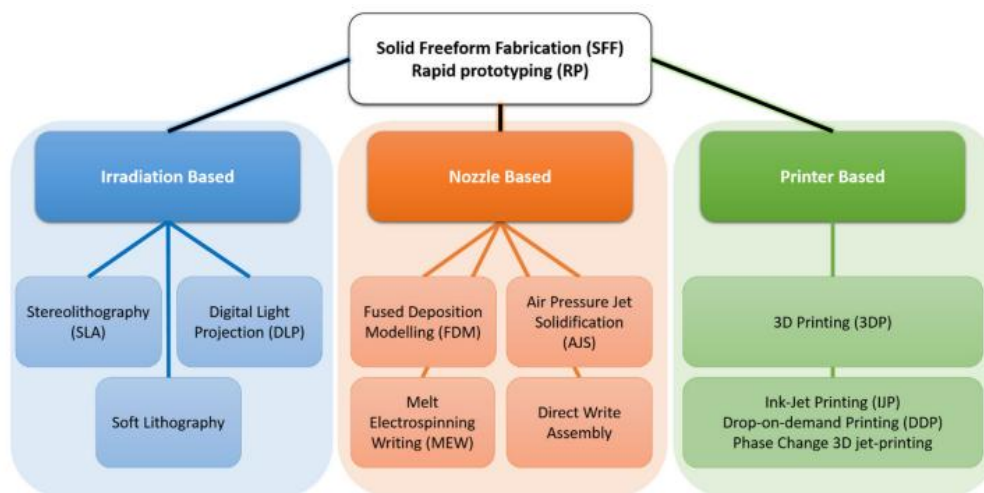
U robocastingu přechází suspenze během průchodu přes trysku z pseudoplastického stavu do dilatantního a zároveň při kontaktu se vzduchem začíná schnout. Proto je minimální průměr trysky omezen na zhruba 500 μm , aby nedocházelo k ucpávání otvoru. Aby se zabránilo těmto jevům, byly vyvinuty speciální náplně, které během extruze prodělávají tzv. reverzibilní gelovou transformaci. V zásobníku tiskové hlavy se chovají jako viskózní gel a při extrudování se vlivem smykového napětí rozpadá gelová struktura a viskozita vzroste. Po vytlačení proběhne opět gelace a míra viskozity se vrátí na původní hodnotu, což zabrání deformaci filamentu. Po vysušení má součást vysokou hustotu (až 60 %), proto lze po slinování dosáhnout téměř úplného zhuštění.[3]



Obrázek 7. Postup metody robocastingu.[3]

3.1.3 Nepřímé metody 3D tisku

Přímými metodami 3D tisku nelze dosáhnout složitějších tvarů výrobků. Tato omezení lze obejít využitím nepřímých metod. V první fázi postupu se klasickými přímými metodami vytiskne inverzní struktura (elektronicky vymodelovaný 3D objekt) vůči struktuře, která je konečným výrobkem.



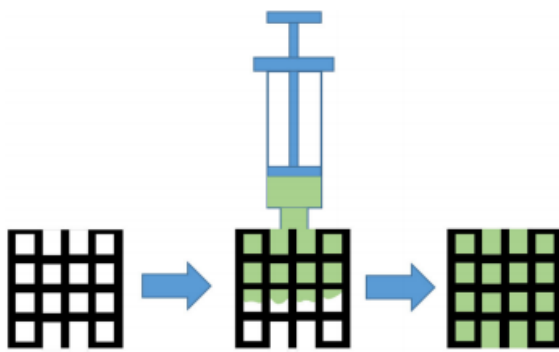
Obrázek 8. Dělení metod aditivní výroby.[7]

Po provedení první fáze se provádí lití materiálu do této porézní struktury a na závěr se forma odstraní. Obecně lze tuto metody rozdělit do tří základních kroků:

1. Výroba porézní formy pomocí přímých metod 3D tisku,
2. Odlévání materiálu a fixace konečného tvaru,
3. Odstranění formy.

Nejčastěji se porézní formy vyrábí pomocí metod SLA nebo SLS, u kterých se dá dosáhnout velice dobrého rozlišení. Po dokončení tisku je potřeba odstranit podpírací struktury a zbytky neopolymerizovaného resp. nespečeného materiálu. To se provádí odfukováním nebo spláchnutím vodou. Z důvodu usnadnění následného odstranění podpěr se použité materiály kombinují. Zpravidla se pro formu volí materiál s vyšší teplotou tavení, aby bylo možné podpěry vytavit pryč.

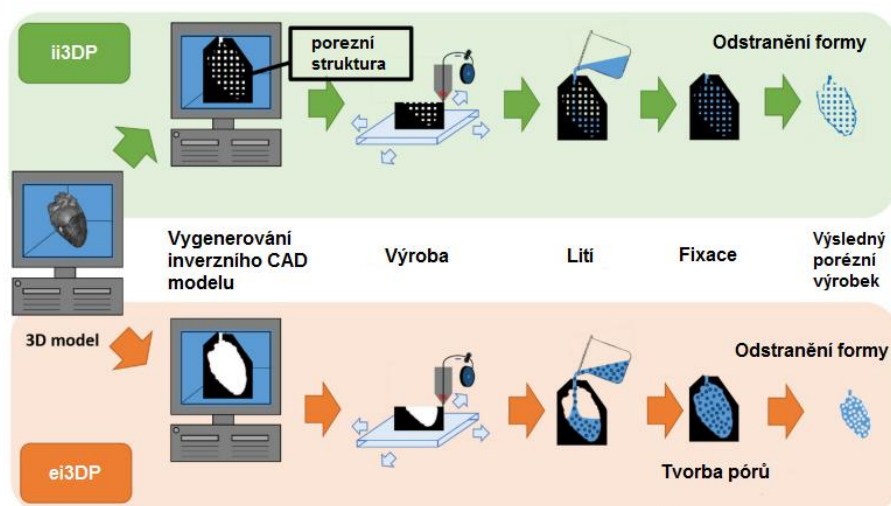
Odlévání zahrnuje naplnění volných prostor konečným materiálem (viz *obr. 9*). Nejčastěji se lití provádí ve vakuovaném prostředí, aby se docílilo odstranění všech nežádoucích vzduchových bublin. Samotné plnění pak probíhá metodou injekčního vstřikování. Pro dosažení požadovaných mechanických vlastností výrobku se součást následně teplotně zpracovává.



Obrázek 9. Postup lití materiálu.[7]

Posledním krokem nepřímého 3D tisku je odstranění formy. Podmínkou tohoto procesu je neexistence jakýchkoliv chemických interakcí mezi formou a použitým materiálem. Pokud forma disponuje nižší teplotou tání než ostatní materiál, lze k odstranění využít selektivní tavení. V jiných případech lze použít vypálení pojiva, chemický rozklad nebo i třeba manuální odstranění.[7]

Nepřímé metody 3D tisku lze také dále dělit podle specifického přístupu na ii3DP (internal) a ei3DP (external). V případě ii3DP se porézní struktura vymodelovaná pomocí CAD softwaru vyrobí přímou metodou 3D tisku. Poté se provede lití cílového materiálu do prostorů této struktury. Po fixaci materiálu se forma odstraní. Kontroluje se tudíž vzhled mikrostruktury uvnitř výrobku. Metoda ei3DP se použije, pokud je primární možnost kontroly



Obrázek 10. Srovnání ii3DP a ei3DP metod.[7]

vnějšího tvaru součásti, nikoliv její vnitřní mikrostruktury. Srovnání obou přístupů je popsáno na obrázku 10.[7]

3.1.4 Shrnutí

3D tisk keramiky lze považovat za pokrokovou oblast tvarování s širokými možnostmi aplikací. Výsledná přesnost výrobku a jeho vlastnosti jsou závislé na využití metodě, použitých materiálech a jejich vlastnostech. Výhody a nevýhody výše zmíněných metod můžeme shrnout následovně:

- **Výhody**

- a) **úspora materiálu**

Z hlediska úspory materiálu je 3D tisk keramiky úspornější. Po výrobě součásti je mechanické opracování minimální, proto nejsou potřeba přídavky materiálu jako například u odlévání.

- b) **nižší cena tvarování**

Z mechanických vlastností keramických materiálů se odvíjí vyšší cena jejího tvarování. Vysoká tvrdost vyžaduje využití diamantových nástrojů a to se odráží na ceně.

c) **vyšší variabilita tvarování**

Tvarů, které jsou těžko dosažitelné konvenčními metody tvarování, lze dosáhnout právě metodami 3D tisku, které jsou v tomto směru méně omezené.

- **Nevýhody**

a) **vysoká pořizovací cena materiálu/tiskárny**

Pokud se k tisku používá přímo keramický materiál, pak je svázán s jedním druhem 3D tiskárny a to zvyšuje cenu buď samotné tiskárny (SLS), nebo spotřebního materiálu (stereolitografie).

b) **omezené typy materiálu**

Použité materiály jsou omezené svým složením. Druh materiálu a velikost jeho částic má zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti.

3.2 Slinování keramiky

Slinování je typ tepelného zpracování, který se využívá zejména v práškové metalurgii a při výrobě keramických materiálů. Jde o tepelně aktivovaný proces, při kterém se mezi částicemi materiálu tvoří vazby a dochází k jeho zhutňování. Mechanismem celého procesu je difuze. Hnací silou slinování je postupné snižování povrchového napětí v látce. Čím menší jsou částice, tím větší je měrný povrch a povrchová energie. Hlavním cílem slinování je co nejvyšší konečná relativní hustota materiálu, jehož struktura je homogenní a jemnozrná.[8]

Slinování v pevné fázi

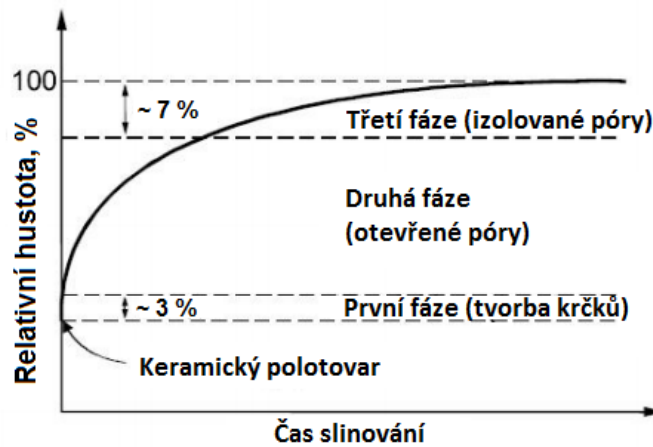
Slinování v pevné fázi nastává, když celý proces slinování a zhutňování je teplotami pod křivkou solidu. Proces je obvykle rozdělen do tří fází, které jsou vyznačené na *obr. 11*, který obsahuje graf závislosti relativní hustoty na průběhu slinování.

Mikrostruktura v jednotlivých fázích se mění v závislosti na čase. Na začátku vstupuje do procesu keramický polotovar, který sestává v ideálním případě z kulových částic stejného poloměru. Z tohoto modelu vyplývá, že jeho relativní hustota se pohybuje okolo 64 %.

V první části slinování se začínají tvořit krčky mezi jednotlivými částicemi. Tato fáze končí při dosažení relativní hustoty přibližně 70 %.[9]

Při druhé fázi slinování dochází k nárůstu rozměrů krčků přibližně do poloviny velikosti částice. Relativní hustota roste až do hodnot okolo 90 %. Vznikají otevřené póry (tubulární póry spojené s vnějším povrchem tělesa).

V průběhu třetí fáze se otevřené póry zužují, což nadále snižuje poróznost materiálu. Vznikají



Obrázek 11. Schéma fází při slinování [8]

tak uzavřené póry a proces slinutí tím končí.[9]

Povrchová energie

Energie povrchu částic materiálu je závislá na zakřivení povrchu. Čím menší je poloměr zakřivení povrchu, tím vyšší je podíl plochy povrchu na jednotku objemu a roste chemický potenciál atomů pod povrchem. Se zakřivením povrchu se zvyšuje i napětí v povrchové vrstvě definované Laplaceovou rovnicí.

$$\sigma = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

kde σ je napětí v povrchové vrstvě, γ je měrná povrchová energie a r_1, r_2 jsou poloměry zakřivení povrchu.[1]

Difuzní pochod

Difuze je základním mechanismem slinovacího procesu. Probíhá ve všech skupenstvích, ale v pevné fázi jde o jediný způsob přenosu hmoty. Podstatou je tepelný pohyb částic hmoty, tudíž intenzita difuze je výrazně závislá na teplotě. Z pravidla probíhá z důvodu rozdílů koncentrací vakancí v materiálu. Základní popis difuzních pochodů umožňují dva Fickovy zákony.[10]

První Fickův zákon udává závislost difuzního toku J na gradientu koncentrace ∇c vztahem

$$\vec{j} = -D \cdot \nabla c, \quad (2)$$

kde D je difuzivita.

Druhý Fickův zákon vyjadřuje změnu koncentrace c difundující látky v závislosti na čase τ a na poloze v prostoru vztahem

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \nabla(D \cdot \nabla c). \quad (3)$$

3.3 Hodnocení přesnosti odlitků

- z hlediska rozměrů

Stejně jako například u ocelových odlitků lze u odlitků z keramických materiálů analyzovat přesnost lití na základě předepsaných norem. Lze využít normu ČSN EN ISO 8062-3:2008 (01 4460) s názvem "Geometrické specifikace produktů (GPS) - Rozměrové a geometrické tolerance tvarovaných součástí - Část 3: Všeobecné rozměrové a geometrické tolerance a přídatky na obrábění pro odlitky". Dle této normy je zavedeno 16 stupňů lineární rozměrové tolerance odlitků. Tyto stupně jsou označeny jako DCTG 1 až DCTG 16 (z anglického Dimensional Casting Tolerance Grade) viz *obr. 12*. Hodnoty mezních úchylek se určují ze stupně dosažitelné přesnosti, jmenovitého a směrodatného rozměru.[11]

Rozměr (mm)		Tolerance (mm) (mezní úchytky jsou $\pm T/2$)													
nad	do	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	10	0,18	0,26	0,36	0,52	0,74	1,0	1,5	2,0	2,8	4,2	—	—	—	—
10	16	0,20	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3,0	4,4	—	—	—	—
16	25	0,22	0,30	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2	4,6	6	8	10	12
25	40	0,24	0,32	0,46	0,64	0,90	1,3	1,8	2,6	3,6	5,0	7	9	11	14
40	63	0,26	0,36	0,50	0,70	1,00	1,4	2,0	2,8	4,0	5,6	8	10	12	16
63	100	0,28	0,40	0,56	0,78	1,10	1,6	2,2	3,2	4,4	6,0	9	11	14	18
100	160	0,30	0,44	0,62	0,88	1,20	1,8	2,5	3,6	5,0	7,0	10	12	16	20
160	250	0,34	0,50	0,70	1,00	1,40	2,0	2,8	4,0	5,6	8,0	11	14	18	22
250	400	0,40	0,56	0,78	1,10	1,60	2,2	3,2	4,4	6,2	9,0	12	16	20	25
400	630	—	0,64	0,90	1,20	1,80	2,6	3,6	5,0	7,0	10	14	18	22	28
630	1 000	—	—	1,00	1,40	2,00	2,8	4,0	6,0	8,0	11	16	20	25	32
1 000	1 600	—	—	—	1,6	2,20	3,2	4,6	7,0	9,0	13	18	23	29	37
1 600	2 500	—	—	—	—	2,60	3,8	5,4	8,0	10	15	21	26	33	42
2 500	4 000	—	—	—	—	—	4,4	6,2	9,0	12	17	24	30	38	49
4 000	6 300	—	—	—	—	—	—	7,0	10	14	20	28	35	44	56
6 300	10 000	—	—	—	—	—	—	—	11	16	23	32	40	50	64

Obrázek 12. Délkové rozměrové tolerance pro stupeň rozměrové tolerance odlitku (rozměry v mm) [12]

- **z hlediska hmotnosti**

Hodnocení přesnosti odlitků z hlediska jejich hmotnosti lze provést výpočtem procentuální chyby výrobků, dále určit rozptyl dat a jejich směrodatnou odchylku.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (5)$$

$$s = \sqrt{s^2}, \quad (6)$$

kde n je počet vyhodnocovaných prvků, s^2 je rozptyl a s směrodatná odchylka.

- **z hlediska hustoty**

Přesnost z hlediska hustoty je založena na stejném principu jako hodnocení z hlediska hmotnosti.

4. Experimentální část

4.1 Použité materiály

Pro přípravu keramických těles byl použit keramický prášek Al_2O_3 Sumitomo AES-11C od japonské firmy Sumitomo Chemical. Výrobní série AES je charakteristická nízkým obsahem Na_2O . V následující tabulce je uvedeno přesné chemické složení a vlastnosti použitého prášku.

<i>Typ prášku</i>	<i>AES-11C</i>	
<i>Chemické složení</i>	<i>H₂O (%)</i>	5
	<i>L.O.I. (%)</i>	0,10
	<i>Fe₂O₃ (%)</i>	0,01
	<i>SiO₂ (%)</i>	0,06
	<i>Na₂O (%)</i>	0,04
	<i>MgO (%)</i>	0,05
	<i>Al₂O₃ (%)</i>	99,80
	<i>D50 (μm)</i>	0,45
<hr/>		
<i>Velikost α-kryystalu (μm)</i>	0,30	
<i>Hustota před slinutím (g/cm³)</i>	2,22	
<i>Hustota po slinutí (g/cm³)</i>	3,94	
<i>Lineární smršťování (%)</i>	17,00	

Tabulka 1. Fyzikální vlastnosti a chemická analýza oxidu hlinitého [13]

4.2 Připravené suspenze

Pro kontrolované odlévání se použila suspenze 50+S s následujícím složením:

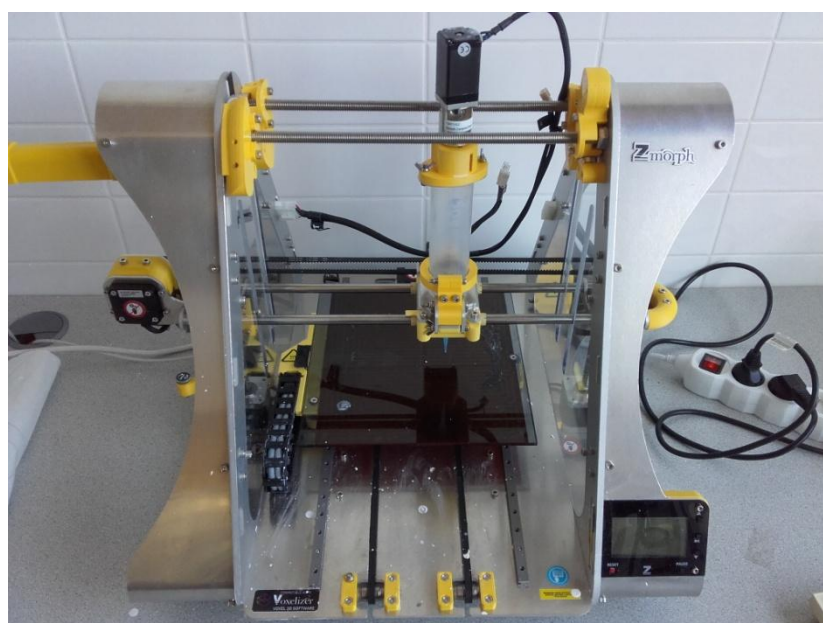
<i>složka</i>	<i>množství pro 500 ml suspenze</i>	<i>účel</i>
<i>darvan</i>	10,4 g	<i>disperzant</i>
<i>octanol</i>	8 kapek	<i>snížení povrchového napětí</i>
<i>kuličky ZrO₂</i>	150 g	<i>míchání</i>
<i>1% roztok PVA</i>	134,03 g	<i>pojivo</i>
<i>cukr</i>	22,52 g	<i>pojivo</i>
<i>prášek Al₂O₃</i>	581,1 g	<i>hlavní složka</i>

Tabulka 2. Složení suspenze 50+S

Pro přímý tisk byla použita podobná suspenze 50+2D. Lišila se od předchozí suspenze pouze v tom, že místo cukru byl použit dextrin, a to v dvojnásobném množství (pro 500 ml suspenze je to 45,04 g dextrinu). Dextrin byl přidán z důvodu snížení viskozity, která pak zajišťovala lepší kontrolovatelnost extruze 3D tiskárny.

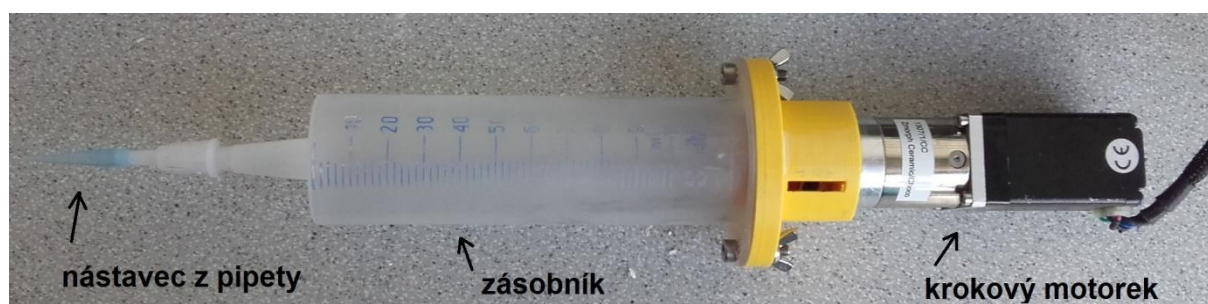
4.3 Použitá 3D tiskárna

K experimentu byla použita 3D tiskárna od firmy ZMorph, konkrétně model 2.0 SX. Jedná se o tiskárnu s multifunkční vyměnitelnou hlavou. Lze ji použít na klasický 3D tisk z PLA vláknem, CNC obrábění nebo řezání pomocí laseru. K našemu experimentu byl však použit nástavec na vytlačování hustých past, čokolády a případně jiných podobných materiálů. Ten se skládá ze zásobníku se zúženým zakončením. Na druhé straně je vybaven krokovým motorkem ovládajícím gumový píst, který ovládá extruzi materiálu.[14]



Obrázek 13. 3D tiskárna ZMorph 2.0 SX

Pro naše použití bylo potřeba ústí dávkovače upravit. Na koncovku se přidal zastřížený konec plastové pipety, aby se docílilo užšího průměru.



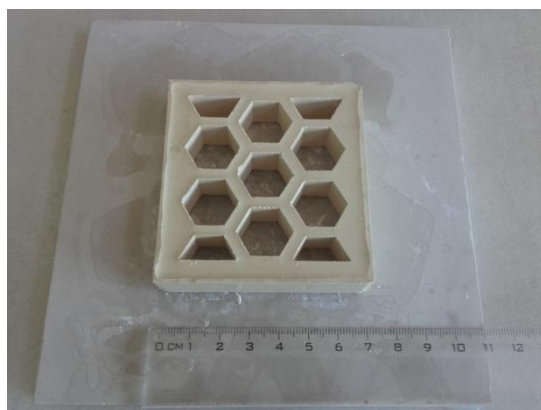
Obrázek 14. Dávkovač 3D tiskárny

Tiskárna pracuje na principu XYZ os, pomocí kterých je přesně definován pohyb hlavy. Využitím softwaru Voxelizer, který zprostředkovává komunikaci tiskárny s uživatelem, se nahráním příslušných g-code souborů ovládal pohyb hlavy tiskárny.

Použité soubory g-code jsou psané ručně, individuálně pro každou z použitých odlévacích forem. Konkrétní g-cody jsou uvedeny v příloze.

Režim A – odlévání

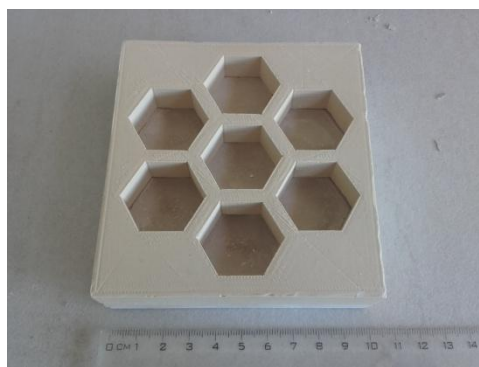
Pro odlití byly použity dva druhy forem. Forma 1 (viz obr. 15) obsahovala pouze pravidelné šestiboké hranoly. Forma 2 (viz obr. 17) měla větší rozměry a pravidelné šestiboké hranoly byly rozšířeny o kulový vrchlík. Toho bylo docíleno tak, že se připravila sádrová deska, která obsahovala tyto kulové vrchlíky (viz obr. 16). Deska byla pak použita místo desky ploché, použité při odlévání do formy 1.



Obrázek 17. Forma 1

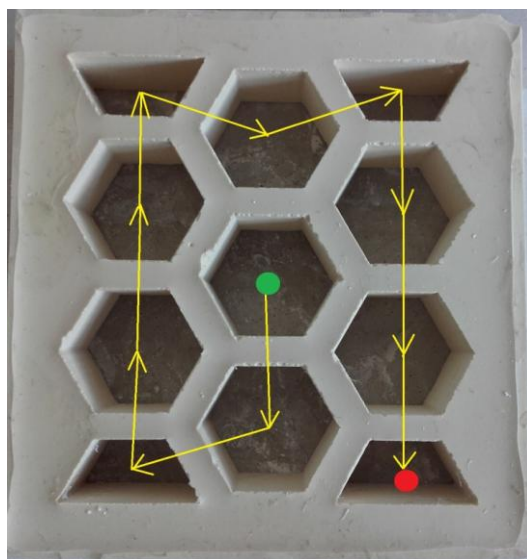


Obrázek 16. Sádrová deska pod formu 2



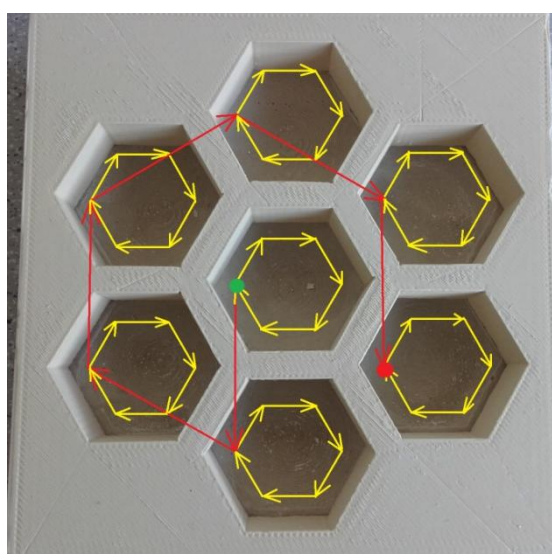
Obrázek 15. Forma 2

Při režimu odlévání do formy 1 vykonávala hlava tiskárny vždy pohyb nad určitý hexagon a poté byla provedena extruze až do jeho naplnění. Po nadávkování všech hexagonů se hlava přesunula na stranu. Extruze proběhla v časové posloupnosti, která je naznačena na *obr. 18*. Mezi každým přesunutím nad další hexagon byla provedena retrakce, tj. zpětné nasání suspenze, aby se zamezilo nechtěnému vytlačení materiálu mimo dutiny formy.



Obrázek 18. Sekvence pohybu hlavy 3D tiskárny při lití do formy 1

Během odlévání do formy 2 byl aplikován podobný postup. Změna byla ve způsobu extrudování suspenze. Oproti formě 1 se dávkovač pohyboval i při samotné extruzi. Vykonával pohyb ve tvaru šestiúhelníku, a to postupně ve dvou různých výškách, aby se docílilo lepšího rozprostření suspenze (viz *obr. 19*).



Obrázek 19. Sekvence pohybu hlavy 3D tiskárny při lití do formy 2

Režim B. – přímý tisk

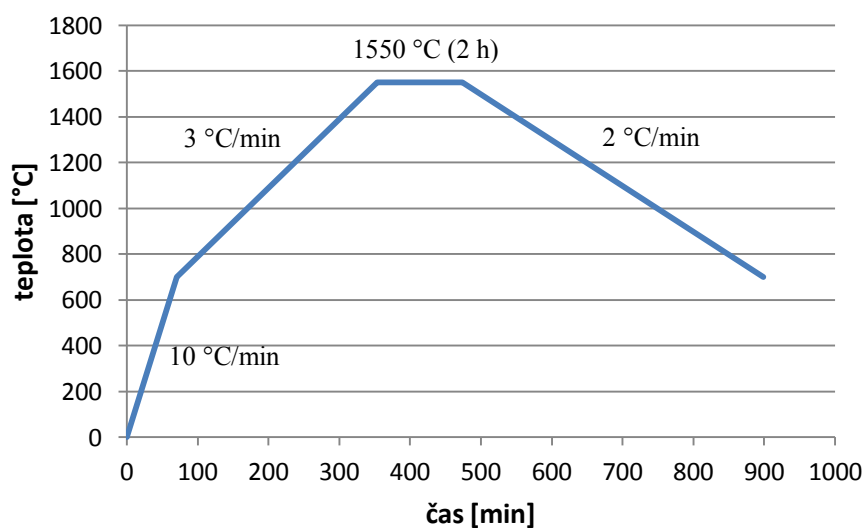
Druhou částí experimentu bylo vyzkoušení 3D tiskárny k přímému tisku suspenze. Ten proběhl bez použití formy, přímo na sádrovou desku. Byl vytvořen g-code, který popisoval pohyb tiskové hlavy po obvodu pravidelného pětiúhelníku a následně extruzi suspenze uvnitř tohoto tvaru. Účelem bylo zjistit, jestli lze 3D tiskárnu využít i na tento typ tisku. Vzorky byly po tisku ponechány na sádrové desce na vysušení a následně tepelně zpracovány ve vysokoteplotní slinovací peci.

4.4 Sušení a odstranění organických složek

Po odlití se nechala suspenze ve formě vyschnout pod digestoří přibližně 3 - 5 dní. Za tuto dobu se do sádrové desky odsála z jednotlivých vzorků voda a se vzorky se pak dalo dále manipulovat. Vzorky se vyjmuly a daly se na Al_2O_3 lodičce vyžít do pece pro odstranění organických pojiv. Vyžítání proběhlo při teplotě $600\text{ }^\circ\text{C}$ za rychlosti ohřevu $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ a výdrží na teplotě 1 h. Vzorky byly ochlazovány v peci.

4.5 Slinování

Slinování bylo provedeno na teplotě $1550\text{ }^\circ\text{C}$ s výdrží 2 h. Byla použita vysokoteplotní slinovací pec HT1800C od firmy Clasic. Na *grafu 1* je schematicky znázorněn průběh slinování. Do teploty $700\text{ }^\circ\text{C}$ se zvolila rychlost ohřevu $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ a následně pak $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Chladnutí proběhlo v peci.



Graf 1. Teplotní program pece při slinování vzorků

4.6 Měření hmotnosti a hustoty

Veškeré statistické vyhodnocování u lití do formy 1 bylo bráno z dat pouze prvních sedmi vzorků ze sekvence. Zbylé dutiny ve formě 1 měly zmenšený objem, tudíž by zpracování výsledků komplikovaly a žádným způsobem nepřinášely směrodatné výsledky. Vzorky z formy 2 byly statisticky vyhodnoceny všechny.

Měření hmotnosti

Hmotnost byla měřena na analytických vahách firmy Mettlet Toledo. Byla zaznamenána hmotnost vzorků po vyžhání i po slinování. Pomocí těchto dat byly analyzovány změny hmotnosti mezi jednotlivými kroky tepelného zpracování.

Měření hustoty

Po slinutí byla u všech vzorků změřena hustota. Byl stanovena také pomocí analytických vah od firmy Mettler Toledo. Vzorky byly nejprve ponechány pod infralampou přibližně na 20 minut, aby se dostatečně vysušily. Následně byla změřena a zapsána nejprve jejich suchá hmotnost. Vzorek byl poté vložen do košíku, který byl ponořen pod vodu. Pro přesné měření musely být vzorky úplně pod hladinou vody. Z displeje vah pak byla odečtena hodnota mokré hmotnosti a zároveň hodnota hustoty vzorku.[16]

4.7 Hodnocení přesnosti metody

Z hlediska rozměrů v rámci přesnosti jednoho vzorku byla použita metoda analýzy dle normy ČSN EN ISO 8062-3 popsané v kapitole 3.3.

Z hlediska změny hmotnosti a hustoty byl určen průměr naměřených hodnot, rozptyl a směrodatná odchylka podle vzorců uvedených v kapitole 3.3. Níže jsou uvedeny příklady výpočtu jmenovaných veličin pro vzorky malých hexagonů z 1. série lití ve stavu po slinutí.

Naměřené hodnoty hmotností pro zmíněnou sérii byly následující (uvedeno v gramech).

i	1	2	3	4	5	6	7
x_i	6,17	6,49	6,31	6,51	6,34	6,45	6,51

Tabulka 3. Hmotnosti vzorků z 1. série lití do formy 1

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \doteq 6,40 \text{ g}$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cdot (x_i - \bar{x})^2 \doteq 0,01 \text{ g}^2$$

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,0142} \doteq 0,12 \text{ g}$$

Zjištěné hodnoty relativních hustot vzorků byly následující (uvedeno v %).

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x_i	96,49	96,57	96,84	96,77	96,79	96,97	96,92	96,74	96,69	96,64	96,97

Tabulka 4. Relativní hustoty vzorků z 1. série lití do formy 1

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \doteq 96,76 \%$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cdot (x_i - \bar{x})^2 \doteq 0,02 \%^2$$

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,0225} \doteq 0,15 \%$$

5. Výsledky a diskuze

5.1 Režim A – odlévání

Nejprve byl proveden test přesnosti dávkování suspenze, tzn. 3D tiskárna provedla 5 stejných odlití. Byly zaznamenány hmotnosti prázdné a naplněné formy a z toho následně vypočítány hmotnosti samotné suspenze. Naměřená data jsou sepsána v následující tabulce.

Měření přesnosti dávkování suspenze:

měření	prázdná forma [g]	naplněná forma [g]	suspenze [g]
1.	146,75	225,74	78,99
2.	162,57	242,10	79,53
3.	157,29	236,44	79,15
4.	162,61	242,57	79,96
průměr			79,41

Tabulka 5. Měření přesnosti dávkování suspenze

Z měření vyplývá, že hodnoty hmotností suspenze samotné se liší od průměrné hodnoty maximálně o 0,55 g. Tímto způsobem byl zkoumána reprodukovatelnost distribuovaného množství v celém objemu potřebném pro odlévání do formy 1. Rozptyl získaných hodnot je 1,2 % a ukázal přesnost dávkování suspenze bez vlivu sušení a interakce se sádrovou deskou.

Malé hexagony

1. série (po vyžihání, před slinutím)

vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m [g]	6,20	6,53	6,35	6,55	6,41	6,47	6,55	3,12	2,97	3,10	3,13
h [mm]	11,16	11,72	11,33	11,60	11,31	11,61	11,70	11,37	10,78	10,97	10,94

Tabulka 6. Vzorky z formy 1 – 1. série (před slinutím)

1. série (po slinutí)

vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m [g]	6,17	6,49	6,31	6,51	6,34	6,45	6,51	3,10	2,96	3,07	3,09
h min [mm]	9,64	10,08	9,91	10,06	9,71	10,07	10,20	9,72	9,09	9,43	9,45
h max [mm]	9,77	10,35	10,13	10,12	9,95	10,21	10,36	9,88	9,32	9,63	9,55
\bar{h} [mm]	9,72	10,19	10,01	10,10	9,85	10,13	10,27	9,78	9,22	9,55	9,50
směr. odch.	0,05	0,11	0,08	0,02	0,08	0,06	0,06	0,06	0,09	0,07	0,04
ρ [g/cm ³]	3,85	3,85	3,86	3,86	3,86	3,87	3,87	3,86	3,86	3,86	3,87
rel. ρ [%]	96,49	96,57	96,84	96,77	96,79	96,97	96,92	96,74	96,69	96,64	96,97

Tabulka 7. Vzorky z formy 1 – 1. série (po slinutí)

2. série (po vyžhání, před slinutím)

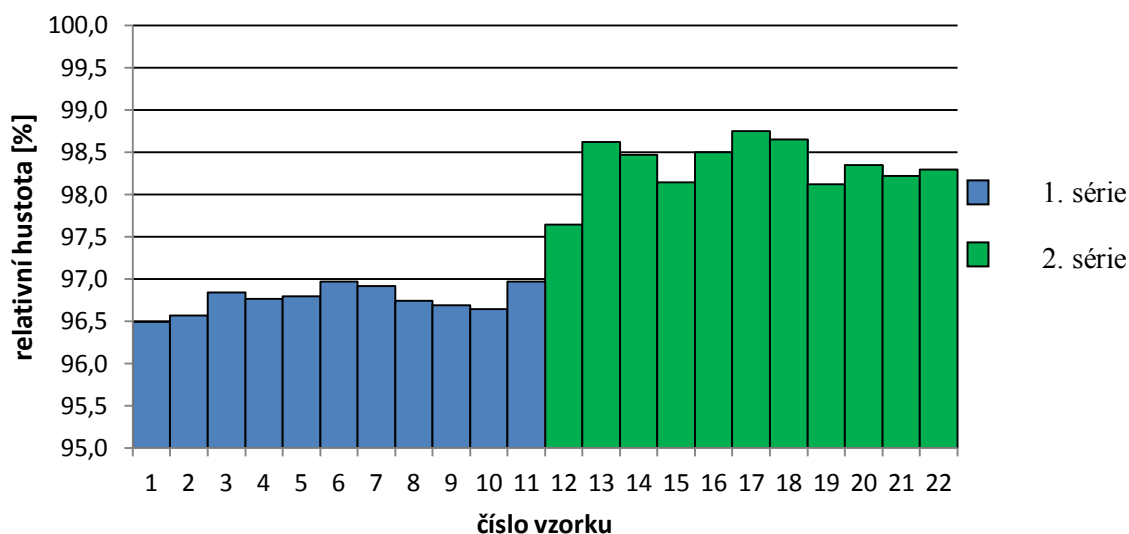
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m [g]	6.23*	6,62	6,60	6,69	6,65	6,67	6,60	3,09	3,16	3,04	3,06
h min [mm]	11,13	11,29	11,55	11,48	11,60	11,04	11,14	10,82	11,30	10,75	10,46
h max [mm]	11,29	11,53	11,77	11,64	11,71	11,07	11,26	11,01	11,40	10,90	10,64
\bar{h} [mm]	11,20	11,38	11,64	11,55	11,63	11,05	11,20	10,74	11,33	10,80	10,52
sm. odch.	0,05	0,09	0,07	0,05	0,04	0,01	0,04	0,06	0,04	0,05	0,07

Tabulka 8. Vzorky z formy 1 – 2. série (před slinutím)

2. série (po slinutí)

vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m [g]	6,20	6,57	6,55	6,66	6,61	6,64	6,59	3,07	3,12	3,02	3,05
h min [mm]	9,68	9,86	9,77	9,88	9,84	9,66	9,69	9,14	9,49	9,12	9,00
h max [mm]	9,84	9,59	9,98	9,97	10,09	9,73	9,77	9,34	9,62	9,27	9,13
\bar{h} [mm]	9,75	9,72	9,89	9,92	9,94	9,70	9,74	9,25	9,55	9,18	9,05
sm. odch.	0,05	0,11	0,09	0,03	0,09	0,02	0,03	0,07	0,05	0,06	0,05
ρ [g/cm ³]	3,90	3,94	3,93	3,92	3,93	3,94	3,94	3,92	3,92	3,92	3,92
rel. ρ [%]	97,64	98,62	98,47	98,15	98,50	98,75	98,65	98,12	98,35	98,22	98,30

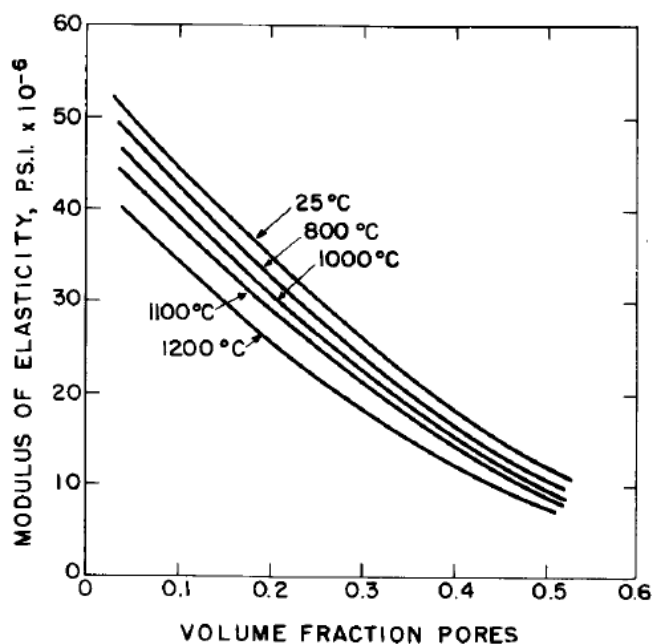
Tabulka 9. Vzorky z formy 1 – 2. série (po slinutí)



Graf 2. Graf výsledných relativních hustot vzorků z formy 1

Z grafu je patrná změna u relativních hustot vzorků v druhé sérii odlévání. V první sérii se v odlité suspenzi vyskytovalo velké množství bublin vzduchu, vzniklých pravděpodobně při míchání suspenze na rotačních válkách. Bubliny způsobovaly menší naměřené relativní hustoty vzorků. Proto bylo u druhé série použito větší množství oktanolu, který snižuje povrchové napětí a tudíž před odlitím umožnil lepší odvzdušnění suspenze.

Porózita keramických materiálů výrazně ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. Například mechanická pevnost a modul pružnosti s množstvím pórů razantně klesá (viz obr. 20).



Obrázek 20. Vliv množství pórů na modul pružnosti [15]

Hodnocení přesnosti metody

Dle zmíněné normy ČSN EN ISO 8062-3 v kapitole 3.3 byly vzorky malých hexagonů zařazeny do rozměrové třídy < 10 mm. Z pěti naměřených hodnot výšek vzorků po slinutí byl určen rozptyl těchto hodnot. Největší rozptyl byl u vzorku č. 2 z první série, a to 0,27 mm. Lze tudíž vzorky zařadit do 5. stupně lineární rozměrové tolerance odlišků.

Přesnost hodnot hmotností a hustot vzorků je vynesena v následující tabulce.

		průměr	směr. odch.	rozptyl	% chyba
1. série	hmotnost [g]	6,40	0,12	0,01	5,3
	r. hustota [%]	96,76	0,15	0,02	0,5
2. série	hmotnost [g]	6,55	0,15	0,02	7,0
	r. hustota [%]	98,34	0,30	0,09	1,1

Tabulka 10. Výsledná přesnost vzorků z formy 1

V důsledku slinování dochází také k rozměrovému smrštění vzorků. Byl proveden výpočet relativního smrštění před a po slinutí v peci. Hodnoty se pohybují v intervalu 10–15 %. Od údajů, uvedených výrobcem Al₂O₃ prášku (17 %), se tedy liší o několik procent. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 11.

1. série	vzorek	1	2	3	4	5	6	7
	smrštění [%]	12,9	13,1	11,7	12,9	12,9	12,7	12,2
2. série	vzorek	1	2	3	4	5	6	7
	smrštění [%]	12,9	14,5	15,0	14,2	14,5	12,3	13,1

Tabulka 11. Smrštění vzorků z formy 1

Velké hexagony

1. série (po vyžhání, před slinutím)

vzorek	1	2	3	4	5	6	7
m [g]	21,24	21,10	22,53	21,90	21,96	21,83	21,63
h min [mm]	15,98	15,98	15,71	15,45	16,62	16,31	16,35
h max [mm]	16,08	16,15	15,83	15,55	16,70	16,46	16,54
\bar{h} [mm]	16,03	16,06	15,79	15,50	16,66	16,37	16,48
sm. odch.	0,04	0,07	0,04	0,04	0,03	0,06	0,07

Tabulka 12. Vzorky z formy 2 – 1. série (před slinutím)

1. série (po slinutí)

vzorek	1	2	3	4	5	6	7
m [g]	21,15	21,01	22,45	21,83	21,87	21,76	21,55
h min [mm]	14,08	14,08	14,70	14,52	14,55	14,28	14,37
h max [mm]	14,17	14,29	14,84	14,57	14,72	14,51	14,51
\bar{h} [mm]	14,12	14,17	14,75	14,55	14,62	14,36	14,45
sm. odch.	0,03	0,07	0,05	0,03	0,06	0,09	0,05
ρ [g/cm ³]	3,86	3,84	3,86	3,87	3,86	3,82	3,82
rel. ρ [%]	96,79	96,29	96,69	96,92	96,69	95,71	95,71

Tabulka 13. Vzorky z formy 2 – 1. série (po slinutí)

2. série (po vyžhání, před slinutím)

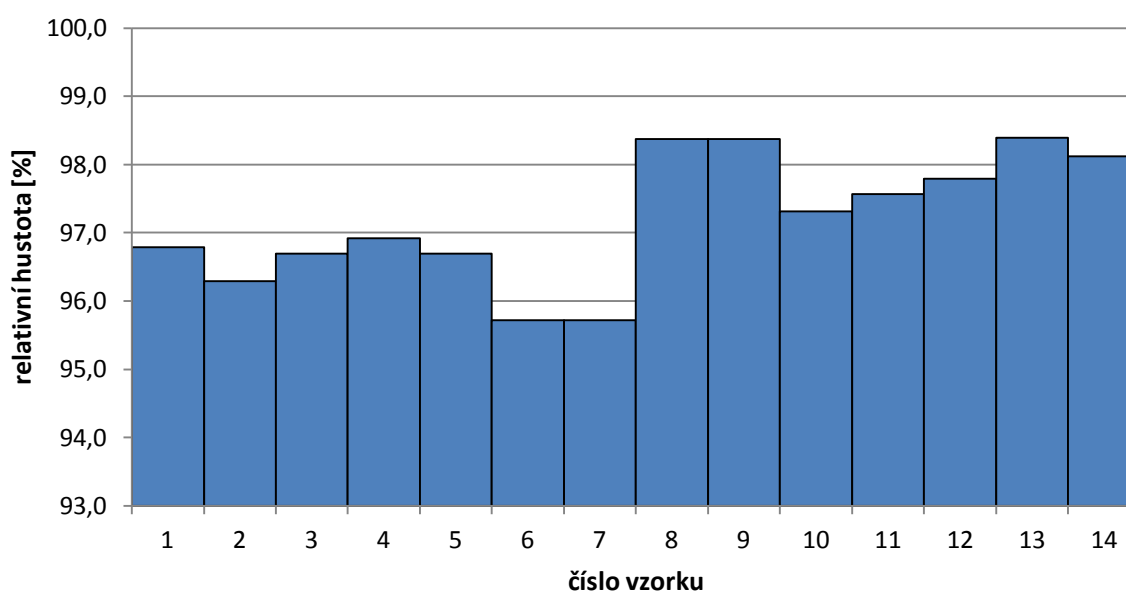
vzorek	1	2	3*	4	5	6	7
m [g]	19,97	20,78	18,96	20,77	20,68	20,53	20,87
h min [mm]	15,02	15,31	14,82	15,43	15,23	15,23	15,48
h max [mm]	15,17	15,53	15,00	15,63	15,78	15,58	15,69
\bar{h} [mm]	15,09	15,40	14,91	15,54	15,44	15,37	15,58
sm. odch.	0,06	0,07	0,06	0,07	0,19	0,12	0,09

Tabulka 14. Vzorky z formy 2 – 2. série (před slinutím)

2. série (po slinutí)

vzorek	1	2	3	4	5	6	7
m [g]	19,86	20,69	18,88	20,68	20,59	20,45	20,79
h min [mm]	13,13	13,17	13,12	13,49	13,78	13,12	13,58
h max [mm]	13,21	13,54	13,41	13,85	13,86	13,24	13,65
\bar{h} [mm]	13,16	13,38	13,25	13,61	13,82	13,18	13,61
sm. odch.	0,03	0,16	0,12	0,14	0,03	0,04	0,03
ρ [g/cm ³]	3,93	3,93	3,88	3,89	3,90	3,93	3,92
rel. ρ [%]	98,37	98,37	97,32	97,57	97,79	98,40	98,12

Tabulka 15. Vzorky z formy 2 – 2. série (po slinutí)



Graf 3. Graf výsledných relativních hustot vzorků z formy 2

Výsledné relativní hustoty nedosahují takových hodnot jako u vzorků litých do formy 1. To může být způsobeno vyšším obsahem bublin v suspenzi a z toho plynoucí vyšší porózitou.

Hodnocení přesnosti metody

Dle normy ČSN EN ISO 8062-3 v kapitole 3.3 byly vzorky velkých hexagonů zařazeny do rozměrové třídy < 10, 16 > mm. Z pěti naměřených hodnot výšek vzorků po slinutí byl určen rozptyl těchto hodnot. Největší rozptyl byl u vzorku č. 2 z druhé série, a to 0,37 mm. Lze tudíž vzorky zařadit do 6. stupně lineární rozměrové tolerance odlitků.

Přesnost hodnot hmotností a hustot vzorků je vynesena v následující tabulce.

		průměr	směr. odch.	rozptyl	% chyba
1. série	hmotnost [g]	21,66	0,45	0,20	6,7
	r. hustota [%]	96,40	0,47	0,22	1,2
2. série	hmotnost [g]	20,28	0,64	0,41	9,4
	r. hustota [%]	97,99	0,40	0,16	1,1

Tabulka 16. Výsledná přesnost vzorků z formy 2

Relativní smrštění vzorků litých do formy 2 je uvedeno v *tabulce 17*. Hodnoty se pohybují stejně jako u vzorků z formy 1 v intervalu 10–15 %. Vzorky č. 3 a 4 nebyly zahrnuty do výsledků, protože byly tepelným zpracováním výrazně poškozeny a jejich relativní smrštění není tudíž reprodukovatelné.

1. série	vzorek	1	2	3	4	5	6	7
	smrštění [%]	11,9	11,8	6,6	6,1	12,2	12,3	12,3
2. série	vzorek	1	2	3	4	5	6	7
	smrštění [%]	12,8	13,1	11,1	12,4	10,5	14,2	12,6

Tabulka 17. Smrštění vzorků z formy 2



Obrázek 21. Ukázkový vzorek odlitku z formy 1 (vpravo) a z formy 2 (vlevo)

Během experimentu odlévání se vyskytly některé komplikace. Hlavním problémem bylo relativně rychlé zasychání keramické suspenze. Po naplnění zásobníku se po delší době (přibližně hodinu po naplnění) začala suspenze zhutňovat a ztrácela tak optimální viskózní vlastnosti potřebné ke správnému průběhu experimentu. K zasychání docházelo i v nejužším místě dávkovače, a to v jeho ústí. Suspenze zde přicházela do styku se vzduchem, což schnutí podstatně urychlovalo. Ucpání pak vedlo k nucenému vyčištění nástavce a zastavení experimentu.

Dalším nedostatkem dávkování byla jeho neúplná kontrolovatelnost. I když byl prostor v zásobníku relativně vzduchově izolován, tíha suspenze způsobovala nežádoucí odkapávání. To způsobovalo určité nepřesnosti v dávkování.

Dále bylo třeba počítat s komplikovanou údržbou celého zařízení. Součásti, které se dostávaly do styku se suspenzí, musely být pravidelně umývány, aby byla 3D tiskárna stále plně funkční.

Možnosti zlepšení metody

Pro lepší přesnost a reprodukovatelnost této metody by bylo potřeba vyvinout keramickou suspenzi, která by měla ideální vlastnosti pro dané využití. Především optimální viskozitu pro zabránění odkapávání a omezení zasychání během dávkování ze zásobníku. Toho by mohlo být docíleno změnou obsaženého množství jednotlivých složek. Zlepšená kontrolovatelnost extruze by zaručila přesnější lití.

5.2 Režim B – přímý tisk

Pro dostatečnou přesnost tohoto typu 3D tisku je nutná kompletní ovladatelnost extruze suspenze. Již při lití do forem jsme se potýkali s komplikacemi, tudíž při přímém tisku nešlo dosáhnout ideálních výsledků.



Obrázek 22. Tvar pětiúhelníku vyrobený přímým tiskem

Výsledný vzorek se rozměrově liší od geometrie tvaru, který použitý g-code popisuje. 3D tiskárna pracovala s pravidelným pětiúhelníkem o straně délky 20 mm. Na vybraném vzorku (viz obr. 22) byl po slinutí naměřen rozměr 18 mm.

Ponecháním suspenze na sádrové desce po delší dobu docházelo k praskání vzorků. To bylo způsobeno velkými rozdíly v rychlostech vysušování okraje a vnitřku tvaru. Rozdílné smrštění vyvolávalo vnitřní pnutí v materiálu, což následně vedlo ke vzniku lomu.

Možnosti zlepšení metody

Zlepšení této metody by spočívalo (podobně jako u lití do forem) v úpravě složení použité suspenze. Konkrétně v tomto případě by se zlepšení týkalo zvýšení viskozity pro vyšší přesnost extruze. Vytlačování suspenze totiž probíhalo velice pomalu a omezení odkapávání je pro přesnost rozhodující.

Ke zvýšení přesnosti by dále vedlo kompletní odstranění vzduchových bublin v suspenzi. Toho by se docílilo přidáním optimálního množství oktanolu.

Další možností zlepšení je úprava použité sádrové desky na odsávání vody ze suspenze. Z důvodu rychlého odsávání docházelo k praskání vzorků. Pokud by se dosáhlo menší savosti sádry, rozdíly smršťování zasychající suspenze by nebyly tak velké. Více homogenní smrštění by vzniku lomu výrazně zamezilo.

6. Závěr

Literární rešerše ukázala široké možnosti použití 3D tisku pro keramické materiály, avšak zejména přímé metody jsou omezeny typem použitého počátečního prášku.

V experimentální části byla úspěšně použita komerčně dostupná 3D tiskárna (primárně používaná pro 3D z polymerních materiálů), kdy byly aplikovány dvě metody tvarování. A to odlévání pomocí speciálního nástavce tiskové hlavy a přímý tisk tvaru.

Odléváním pomocí dávkovače do silikonových forem se sádrovou deskou bylo dosaženo přesnosti tvarů odpovídající 5. stupni lineární rozměrové tolerance odlitků u formy 1 a 6. stupni u lití do formy 2 (hodnoceno podle ČSN EN ISO 8062-3).

Kontrolním měřením hmotnosti mezi jednotlivými procesními kroky ukázalo, že lze dávkovat suspenzi s přesností 1,2 %. V rámci série lze dosáhnout hmotnostních rozdílů s chybou 5,3 %. Při měření relativních hustot jednotlivých vzorků bylo dosaženo přesnosti s 1,0% chybou. U série malý hexagonů bylo zjištěno, že zvýšení výsledné relativní hustoty vzorků, které bylo způsobeno obsahem vzduchových bublin v suspenzi, lze dosáhnout přidáním optimálního množství oktanolu.

Využití zmíněné 3D tiskárny k přímému 3D tisku je možné, ovšem s řadou omezení. Mezi možná řešení patří úprava chemického složení použité suspenze, přizpůsobení dávkovače tiskové hlavy nebo přizpůsobení nasákavosti sádrové desky.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] MACA, Karel. *Slinování pokročilých keramických materiálů: Sintering of advanced ceramic materials : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Materiálové vědy a inženýrství*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4099-9.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 8072042483.
- [3] ZOCCA, Andrea, Paolo COLOMBO, Cynthia M. GOMES a Jens GÜNSTER. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 1507, **98**(7), 1983-2001 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.1111/jace.13700. ISSN 0002-7820.
- [4] DECKERS, J., J. VLEUGELS and J.P. KRUTHL. Additive Manufacturing of Ceramics: A Review, *J. Ceram. Sci. Technol.*, 5 (2014) 245-260.
- [5] GRIFFITH, M. L. and J. W. HALLORAN, "Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography," *J. Am. Ceram. Soc.*, **79** [10] 2601-8 (1996).
- [6] ZHOU, W., D. LI, and H. WANG, "A Novel Aqueous Ceramic Suspension for Ceramic Stereolithography," *Rapid Prototyp. J.*, **16** [1] 29-35 (2010).
- [7] HOUBEN, Annemie, Jasper VAN HOORICK, Jürgen VAN ERPS, Hugo THIENPONT, Sandra VAN VLIERBERGHE a Peter DUBRUEL. Indirect Rapid Prototyping: Opening Up Unprecedented Opportunities in Scaffold Design and Applications. *Annals of Biomedical Engineering* [online]. New York: Springer US, 1701, **45**(1), 58-83 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1007/s10439-016-1610-x. ISSN 0090-6964.
- [8] KANG, Suk-Joong L. *Sintering: densification, grain growth, and microstructure*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750663855.
- [9] FANG, Zhigang Zak. *Sintering of advanced materials: fundamentals and processes*. Oxford: Woodhead, 2010, xvi, 483 s. : il., grafy, čb. fot. ISBN 978-1-84569-562-0.
- [10] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 8072042831.
- [11] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích / 7. svazek, S - Provoz podniků. T - Obrábění. U - Konstrukce odlitků*. Praha: Scientia, 1996, 216 s. : il., tabulky, grafy. ISBN 80-7183-024-0.
- [12] ČSN EN ISO 8062-3: 2007. Geometrické specifikace produktů (GPS) - Rozměrové a geometrické tolerance tvarovaných součástí. Část 3, Všeobecné rozměrové a geometrické tolerance a přídavky na obrábění pro odlitky. Praha: Český normalizační institut, 2008. 32 s.

- [13] Sumitomo Chemical: Creative Hybrid Chemistry For a Better Tomorrow. ©2015 Sumitomo Chemical Co.,Ltd. [online]. 2015 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.sumitomo-chem.co.jp/english/>
- [14] ZMorph: More than a printer. © 2015 ZMorph. [online]. 2015 [cit. 2017-5-16] Dostupné z: <https://zmorph3d.com/products/zmorph-2-0-sx>
- [15] COBLE, R. L.; KINGERY, W. D. Effect of porosity on physical properties of sintered alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 1956, 39.11: 377-385 s.
- [16] ČSN EN 993-1: 1996. Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné – Část 1: Stanovení objemové hmotnosti, zdánlivé pórovitosti a skutečné pórovitosti. Praha: Český normalizační institut, 1996. 9 s.

8. Seznam obrázků

Obrázek 1. a) umělecký model "květiny" zhotovený pomocí 3D tisku z prášku; b) fotografie jedné vrstvy během procesu.[3].....	14
Obrázek 2. Postup metody 3D tisku z prášku.[3].....	14
Obrázek 3. Postup metody stereolitografie.[3].....	15
Obrázek 4. Postup metody LOM.[3]	15
Obrázek 5. SEM snímek povrchu zubní korunky zhotovené pomocí DIP.[3]	16
Obrázek 6. Postup metody DIP.[3].....	16
Obrázek 7. Postup metody robocastingu.[3].....	17
Obrázek 8. Dělení metod aditivní výroby.[7]	17
Obrázek 9. Postup lití materiálu.[7].....	18
Obrázek 10. Srovnání ii3DP a ei3DP metod.[7]	19
Obrázek 11. Schéma fází při slinování [8].....	21
Obrázek 12. Délkové rozměrové tolerance pro stupeň rozměrové tolerance odlitku (rozměry v mm) [12]	22
Obrázek 13. 3D tiskárna ZMorph 2.0 SX.....	25
Obrázek 14. Dávkovač 3D tiskárny.....	25
Obrázek 17. Forma 2	26
Obrázek 16. Sádrová deska pod formu 2	26
Obrázek 15. Forma 1	26
Obrázek 18. Sekvence pohybu hlavy 3D tiskárny při lití do formy 1	27
Obrázek 19. Sekvence pohybu hlavy 3D tiskárny při lití do formy 2	27
Obrázek 20. Vliv množství pórů na modul pružnosti [15]	33
Obrázek 21. Ukázkový vzorek odlitku z formy 1 (vpravo) a z formy 2 (vlevo)	36
Obrázek 22. Tvar pětiúhelníku vyrobený přímým tiskem	37

9. Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1. Fyzikální vlastnosti a chemická analýza oxidu hlinitého [13]	24
Tabulka 2. Složení suspenze 50+S	24
Tabulka 3. Hmotnosti vzorků z 1. série lití do formy 1	29
Tabulka 4. Relativní hustoty vzorků z 1. série lití do formy 1	30
Tabulka 5. Měření přesnosti dávkování suspenze	31
Tabulka 6. Vzorky z formy 1 – 1. série (před slinutím)	31
Tabulka 7. Vzorky z formy 1 – 1. série (po slinutí)	31
Tabulka 8. Vzorky z formy 1 – 2. série (před slinutím)	32
Tabulka 9. Vzorky z formy 1 – 2. série (po slinutí)	32
Tabulka 10. Výsledná přesnost vzorků z formy 1	33
Tabulka 11. Smrštění vzorků z formy 1	34
Tabulka 12. Vzorky z formy 2 – 1. série (před slinutím)	34
Tabulka 13. Vzorky z formy 2 – 1. série (po slinutí)	34
Tabulka 14. Vzorky z formy 2 – 2. série (před slinutím)	34
Tabulka 15. Vzorky z formy 2 – 2. série (po slinutí)	35
Tabulka 16. Výsledná přesnost vzorků z formy 2	36
Tabulka 17. Smrštění vzorků z formy 2	36
Graf 1 Teplotní program pece při slinování vzorků	28
Graf 2 Graf výsledných relativních hustot vzorků z formy 1	32
Graf 3 Graf výsledných relativních hustot vzorků z formy 2	35

10. Seznam příloh

1. Odlévání do formy 1 (g-code).....	45
2. Odlévání do formy 2 (g-code).....	46
3. Přímý tisk pravidelného pětiúhelníku (g-code).....	49

11. Přílohy

a) Odlévání do formy 1

G91;
G1 E30 F3000;
G90
G91;
G1 E-20 F3000;
G90
G4 S1;
G0 X100 Y100 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X100 Y80 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X82 Y73 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E225 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X82 Y90 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;

G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X82 Y110 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X82 Y126 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E225 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X100 Y120 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X82 Y90 Z64;
G4 S1;
G91;
G0 X118 Y126 Z64;
G4 S1;

G91;
G1 E225 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X118 Y110 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X118 Y90 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E440 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X118 Y73 Z64;
G4 S1;
G91;
G1 E225 F3000;
G90;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G0 X160 Y100;

b) Odlévání do formy 2

;PRVNÍ

G91;
G1 E0 F3000;
G90;
G0 X100 Y100 Z60;
G0 X100 Y100 Z49;
G1 X90 Y100;
G1 X95 Y108.6 E50 F500;
G1 X105 Y108.6 E100 F500;
G1 X110 Y100 E150 F500;
G1 X105 Y91.4 E200 F500;
G1 X95 Y91.4 E250 500;
G1 X90 Y100 E300 F500;
G1 X95 Y108.6 E350 F500;
G1 X105 Y108.6 E400 F500;
G1 X110 Y100 E450 F500;
G1 X105 Y91.4 E500 F500;
G1 X95 Y91.4 E550 F500;
G1 X90 Y100 E600 F500;
G1 X95 Y108.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X105 Y108.6 E50 F500;
G1 X110 Y100 E100 F500;
G1 X105 Y91.4 E150 F500;
G1 X95 Y91.4 E200 F500;
G1 X90 Y100 E250 F500;
G1 X95 Y108.6 E300 F500;
G1 X105 Y108.6 E350 F500;
G1 X110 Y100 E400 F500;
G1 X105 Y91.4 E450 F500;
G1 X95 Y91.4 E500 F500;
G1 X90 Y100 E550 F500;
G1 X95 Y108.6 E600 F500;
G1 X105 Y108.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
;DRUHÁ

G0 X100 Y68 Z60;
G91;
G1 E0 F3000;
G90;
G0 X100 Y68 Z60;
G0 X100 Y68 Z49;
G1 X90 Y68;
G1 X95 Y76.6 E50 F500;
G1 X105 Y76.6 E100 F500;
G1 X110 Y68 E150 F500;
G1 X105 Y59.4 E200 F500;
G1 X95 Y59.4 E250 500;
G1 X90 Y68 E300 F500;
G1 X95 Y76.6 E350 F500;
G1 X105 Y76.6 E400 F500;
G1 X110 Y68 E450 F500;
G1 X105 Y59.4 E500 F500;
G1 X95 Y59.4 E550 F500;
G1 X90 Y68 E600 F500;
G1 X95 Y76.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X105 Y76.6 E50 F500;
G1 X110 Y68 E100 F500;
G1 X105 Y59.4 E150 F500;
G1 X95 Y59.4 E200 F500;
G1 X90 Y68 E250 F500;
G1 X95 Y76.6 E300 F500;
G1 X105 Y76.6 E350 F500;
G1 X110 Y68 E400 F500;
G1 X105 Y59.4 E450 F500;
G1 X95 Y59.4 E500 F500;
G1 X90 Y68 E550 F500;
G1 X95 Y76.6 E600 F500;
G1 X105 Y76.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
;TŘETÍ
G0 X73 Y85 Z60;
G91;
G1 E0 F3000;
G90;

G0 X73 Y85 Z60;
G0 X73 Y85 Z49;
G1 X63 Y85;
G1 X68 Y93.6 E50 F500;
G1 X78 Y93.6 E100 F500;
G1 X83 Y85 E150 F500;
G1 X78 Y76.4 E200 F500;
G1 X68 Y76.4 E250 500;
G1 X63 Y85 E300 F500;
G1 X68 Y93.6 E350 F500;
G1 X78 Y93.6 E400 F500;
G1 X83 Y85 E450 F500;
G1 X78 Y76.4 E500 F500;
G1 X68 Y76.4 E550 F500;
G1 X63 Y85 E600 F500;
G1 X68 Y93.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X78 Y93.6 E50 F500;
G1 X83 Y85 E100 F500;
G1 X78 Y76.4 E150 F500;
G1 X68 Y76.4 E200 F500;
G1 X63 Y85 E250 F500;
G1 X68 Y93.6 E300 F500;
G1 X78 Y93.6 E350 F500;
G1 X83 Y85 E400 F500;
G1 X78 Y76.4 E450 F500;
G1 X68 Y76.4 E500 F500;
G1 X63 Y85 E550 F500;
G1 X68 Y93.6 E600 F500;
G1 X78 Y93.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
;ČTVRTÁ
G0 X73 Y117 Z60;
G91;
G1 E0 F3000;
G90;
G0 X73 Y117 Z60;
G0 X73 Y117 Z49;
G1 X63 Y117;
G1 X68 Y125.6 E50 F500;

G1 X78 Y125.6 E100 F500;
G1 X83 Y117 E150 F500;
G1 X78 Y108.4 E200 F500;
G1 X68 Y108.4 E250 500;
G1 X63 Y117 E300 F500;
G1 X68 Y125.6 E350 F500;
G1 X78 Y125.6 E400 F500;
G1 X83 Y117 E450 F500;
G1 X78 Y108.4 E500 F500;
G1 X68 Y108.4 E550 F500;
G1 X63 Y117 E600 F500;
G1 X68 Y125.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X78 Y125.6 E50 F500;
G1 X83 Y117 E100 F500;
G1 X78 Y108.4 E150 F500;
G1 X68 Y108.4 E200 F500;
G1 X63 Y117 E250 F500;
G1 X68 Y125.6 E300 F500;
G1 X78 Y125.6 E350 F500;
G1 X83 Y117 E400 F500;
G1 X78 Y108.4 E450 F500;
G1 X68 Y108.4 E500 F500;
G1 X63 Y117 E550 F500;
G1 X68 Y125.6 E600 F500;
G1 X78 Y125.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
;PÁTÁ
G0 X100 Y133 Z60;
G91;
G1 E0 F3000;
G90;
G0 X100 Y133 Z60;
G0 X100 Y133 Z49;
G1 X90 Y133;
G1 X95 Y141.6 E50 F500;
G1 X105 Y141.6 E100
F500;
G1 X110 Y133 E150 F500;
G1 X105 Y124.4 E200
F500;
G1 X95 Y124.4 E250 500;

G1 X90 Y133 E300 F500;
G1 X95 Y141.6 E350 F500;
G1 X105 Y141.6 E400
F500;
G1 X110 Y133 E450 F500;
G1 X105 Y124.4 E500
F500;
G1 X95 Y124.4 E550 F500;
G1 X90 Y133 E600 F500;
G1 X95 Y141.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X105 Y141.6 E50 F500;
G1 X110 Y133 E100 F500;
G1 X105 Y124.4 E150
F500;
G1 X95 Y124.4 E200 F500;
G1 X90 Y133 E250 F500;
G1 X95 Y141.6 E300 F500;
G1 X105 Y141.6 E350
F500;
G1 X110 Y133 E400 F500;
G1 X105 Y124.4 E450
F500;
G1 X95 Y124.4 E500 F500;
G1 X90 Y133 E550 F500;
G1 X95 Y141.6 E600 F500;
G1 X105 Y141.6 E650
F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
;ŠESTÁ
G0 X128 Y117 Z60;
G91;
G1 E0 F3000;
G90;
G0 X128 Y117 Z60;
G0 X128 Y117 Z49;
G1 X118 Y117;
G1 X123 Y125.6 E50 F500;
G1 X133 Y125.6 E100
F500;
G1 X138 Y117 E150 F500;

G1 X133 Y108.4 E200
F500;
G1 X123 Y108.4 E250 500;
G1 X118 Y117 E300 F500;
G1 X123 Y125.6 E350
F500;
G1 X133 Y125.6 E400
F500;
G1 X138 Y117 E450 F500;
G1 X133 Y108.4 E500
F500;
G1 X123 Y108.4 E550
F500;
G1 X118 Y117 E600 F500;
G1 X123 Y125.6 E650
F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X133 Y125.6 E50 F500;
G1 X138 Y117 E100 F500;
G1 X133 Y108.4 E150
F500;
G1 X123 Y108.4 E200
F500;
G1 X118 Y117 E250 F500;
G1 X123 Y125.6 E300
F500;
G1 X133 Y125.6 E350
F500;
G1 X138 Y117 E400 F500;
G1 X133 Y108.4 E450
F500;
G1 X123 Y108.4 E500
F500;
G1 X118 Y117 E550 F500;
G1 X123 Y125.6 E600
F500;
G1 X133 Y125.6 E650
F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
;SEDMÁ
G0 X129 Y84 Z60;
G91;

G1 E0 F3000;
G90;
G0 X129 Y84 Z60;
G0 X129 Y84 Z49;
G1 X119 Y84;
G1 X124 Y92.6 E50 F500;
G1 X134 Y92.6 E100 F500;
G1 X139 Y84 E150 F500;
G1 X134 Y75.4 E200 F500;
G1 X124 Y75.4 E250 500;
G1 X119 Y84 E300 F500;
G1 X124 Y92.6 E350 F500;
G1 X134 Y92.6 E400 F500;
G1 X139 Y84 E450 F500;
G1 X134 Y75.4 E500 F500;
G1 X124 Y75.4 E550 F500;
G1 X119 Y84 E600 F500;
G1 X124 Y92.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 Z55;
G1 X134 Y92.6 E50 F500;
G1 X139 Y84 E100 F500;
G1 X134 Y75.4 E150 F500;
G1 X124 Y75.4 E200 F500;
G1 X119 Y84 E250 F500;
G1 X124 Y92.6 E300 F500;
G1 X134 Y92.6 E350 F500;
G1 X139 Y84 E400 F500;
G1 X134 Y75.4 E450 F500;
G1 X124 Y75.4 E500 F500;
G1 X119 Y84 E550 F500;
G1 X124 Y92.6 E600 F500;
G1 X134 Y92.6 E650 F500;
G91;
G1 E-10 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-60 F3000;
G90;
G0 X170 Y84 Z60;

c) Přímý tisk pravidelného pětiúhelníku

G0 X100 Y100 Z43 F1800;
G0 Z43;
G92 E0;
G1 X100 Y80 E15 F400;
G1 X120 Y90 E30;
G1 X130 Y80 E45;
G1 X130 Y90 E60;
G92 E0;
;OBVOD
G1 X120 Y100 E15 F400;
G1 X126.18 Y119.02 E30;
G1 X110 Y130.78 E45;
G1 X93.82 Y119.02 E60;
G1 X100 Y100 E75;
G1 X120 Y100 E90;
G92 E0;
;VÝPLŇ
G0 X103 Y103;
G1 X103 Y123 E25;
G1 X110 Y103 E50;
G1 X108 Y125 E75;
G1 X118 Y103 E100;
G1 X112 Y123 E125;
G1 X120 Y116 E150;
G91;
G1 E-30 F3000;
G90;
G4 S1;
G91;
G1 E-70 F3000;
G90;
G0 X140 Y85 Z60;