

ИЗРАБОТВАНЕ И ИЗГАРЯНЕ НА МОДЕЛИ ЗА ЛЕЕНЕ ПО СТОПЯЕМИ МОДЕЛИ ОТ PLA ЧРЕЗ REPRAP 3D ПРИНТЕР

BUILDING AND BURNING OF PLA CASTING PATTERNS FOR INVESTMENT CASTING PRODUCED BY REPRAP 3D PRINTER

гл. ас. д-р инж. Минев Е., ас. инж. Янков Е., доц. д-р инж. Минев Р.
Русенски университет „А.Кънчев“, Русе, България

eminev@uni-ruse.bg, eyankov@uni-ruse.bg, rus@uni-ruse.bg

Abstract: The paper illustrates the possibility of developing of a technological chain for Rapid Metal Castings and its specific applications in education, research and commercial areas. The potential to use RepRap 3D printer for producing of PLA investment casting patterns is described. The implemented 3D printer is Velleman K8200. The price of such printer is 10 - 25 times less than other RP technologies which is the essential aspect of the proposed project. The temperatures and times are investigated to find out a successful burn out cycle of PLA casting patterns. The findings show that the acceptable residual ash content (less than 0.8%) can be achieved by burn temperature of 500°C for one hour.

Keywords: 3D PRINTING, RAPID PROTOTYPING, SACRIFICIAL METAL CASTING PATTERNS, VACUUM INVESTMENT CASTING, BLOCK MOULD CASTING

1. Въведение

В лабораторията по лярски процеси към катедра МТМ се работи в областта на Прецизното лееие и разработването на специални сплави с използване на вакуумни топлини агрегати. Тези изследвания имат дългосрочна основа, като след 2004 година колективът допълнително беше ангажиран в това направление чрез международните проекти в 6-та и 7-ма рамкова програма на ЕС 'SARE' и '4M'.

Понастоящем усилията са насочени към възстановяване и модернизиране на лабораторната инфраструктура и технологичното оборудване. Разработва се комплекс от технологични процеси, които да дадат възможност за изследователска дейност с приложни аспекти в областта на т. н. "reverse engineering".

Разработваната технология представлява интегрирана верига от:

- (i) CAD/CAM проектиране;
- (ii) послойно изграждане на лярски модели;
- (iii) прецизно вакуумно лееие в керамични блок-форми.

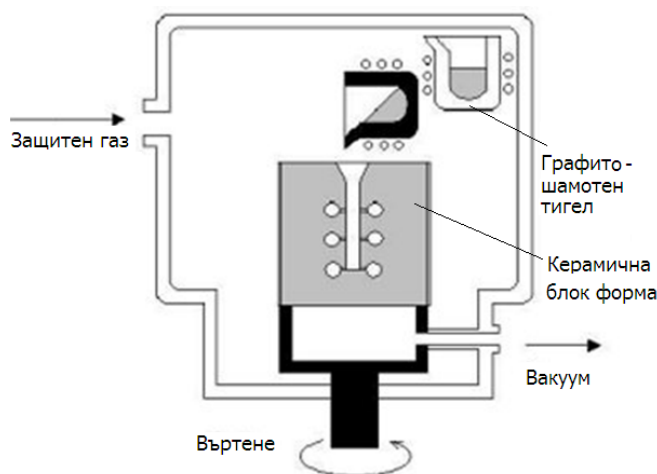
Процесът дава възможност за експресно изготвяне на "концептуални" и "функционални" метални прототипи от разнообразни високояки, корозионно устойчиви, антифрикционни, и пр. сплави на основата на Al, Cu, Fe, Co, Ni, Ti.

Оборудването за лееие чрез индукционното стопяване във вакуум (Leybold, MCP, Schultheiss) с което разполага катедра Металознание и технология на металите в Русенския университет е уникално за страната, както и в международен план (Фиг. 1 и 2). То дава възможност за получаване на сложни лигатури и сплави с разнообразен фазов и химичен състав.

Предвижда се технологията да се прилага широко в следните области:

- при изработване на единични и дребно-сериенни отливки;
- във фазата на концептуално разработване и тестване на нови изделия и машини;
- за изработване на резервни части и специфични корпусно-призматични тънкостенни детайли;
- за ремонт, усъвършенстване и адаптиране на машини и съоръжения;
- в художественото лееие;

- при изработване на медицински импланти и зъбно протезиране.



Фиг. 1. Схема на машина за прецизно лееие в блок-форми с комбинирано използване на диференциално налягане и центробежни сили Schultheiss.

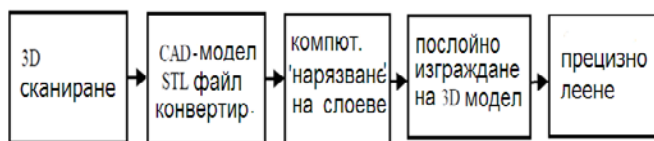


Фиг.2. Машина за лееие в блок форми MCP.

Основните предимства на технологията за вакуумно прецизно леене в блок форми [1-3] в съчетание с 3D проектиране и послойно изграждане на моделите са:

- възможност за леене на отливки с висока сложност на формата;
- съкращаване на подготвителния цикъл и общото време за получаване на изделието до 3 денонощия;
- получаване на бездефектни отливки с намалена пористост и повишени механични и експлоатационни показатели;
- висока точност и размерна стабилност на изделията;
- разнообразие от леярски и нетипични леярски сплави.

Леярските технологии за прецизно леене могат да съставят затварящото звено в технологична верига за бързо изготвяне на малки серии метални изделия (Фиг.3).



Фиг. 3. Верига за бързо прототипиране (reverse engineering) с използване на технологии за вакуумно прецизно леене по стопяеми/изпаряеми модели.

За изграждане на такава верига, в рамките на този проект се придоби оборудване за бързо прототипиране - 3D принтер (машина предназначена за производството на леярски модели от специални полимери -Velleman K8200 3D Printer Kit). Разработваната технологичната верига може да се използва многоцелево за:

- Подобряване подготовката на студентите и особено в областта на новите и неметални материали.
- Развиване на интердисциплинарни умения в областта на материалознанието, механиката, електрониката и управлението, CAD/CAM.
- Развитие на материалната база на катедрата за изследователска работа и създаване на условия за докторанти и студенти от магистърска степен.

Предвижда се интегриране на процесите с компютъризирана система за лазерно сканиране и получаване на обемни цифровизирани профили (DAVID scanners). Ще бъдат направени допълнителни крачки в посока на закупуване на 3D принтери от същия или по-висок клас с възможности за мултифункционално използване като сканираща платформа, както и за разработване и/или закупуване на специализиран софтуер.

2. Методи за изготвяне на леярски модели чрез бързо прототипиране (RP – Rapid Prototyping)

Едно изследване [4] направено още през 2003 г. идентифицира около четиридесет технологични подхода за RP, а една обща класификацията на процесите е дадена в [5]. Само някои от методите за RP са подходящи за изработка на стопяеми/изпаряеми или постоянни леярски модели (Таблица 1).

Пред вид икономическия фактор, за изготвяне на модели в нашия проект се използва 3D принтер Velleman K8200, който е от типа RepRap [6, 7]. Основните характеристики на апарата са: габаритни размери - 600 x 450 x 600mm; тегло: 8.7 kg; максимални размери за изграждане до 200 x 200 x 200 mm; дебелина на слоя: 0.25 mm; минимална дебелина на стената -

0.5 mm; цена на 1 kg материал: 80 лв.; материали: PLA или ABS; скорост на изграждане: 15 - 300 mm/s.

Таблица 1. Основни RP системи използвани за производство на леярски модели.

Метод	Предимства	Недостатъци
SLA Стереолитография	Качествена повърхност; Сложна геометрия; Добра точност.	Подкрепящи структури; Частите се деформират; Изпаренията са вредни.
SLS Селективно лазерно синтероване	Не е необходимо досинтероване; Не са нужни допълнителни подпорни структури; Широка гама от материали.	Повърхностите са порести; Продължително време и значителна енергия; При производство на модели за прецизно леене се изисква допълнителна обработка; Значителни деформации.
LOM Моделиране чрез ламиниране	Детайлите могат допълнително да се обработват (шлайфат, пробиват); Възможност за изработка на големи детайли бързо и евтино.	Тънките стени имат ниска якост и лесно абсорбират влага; Повърхността е лоша; Отделянето на детайлите е трудно.
FDM Моделиране посредством отлагане чрез разтопяване	Широка гама от полимерни материали; Машините лесно се настройват и използват в офис среда.	Подпорни структури; Ниска якост във вертикално направление; Процесът е бавен; Грава и "текстурирана" външна повърхност; Проблематични за инструментално производство.
MJM Многоструйно отлагане	Подходящ за офис среда; Времето за изграждане е кратко.	Подпорките се отстраняват и оставят следи, което ограничава използването им за модели за леене. Якостта е ниска.
3DP Триизмерен печат	Къси срокове и евтини суровини; Няма подкрепящи структури; Сложна геометрия.	Креки детайли, изискват инфилтрация; Грава повърхност.

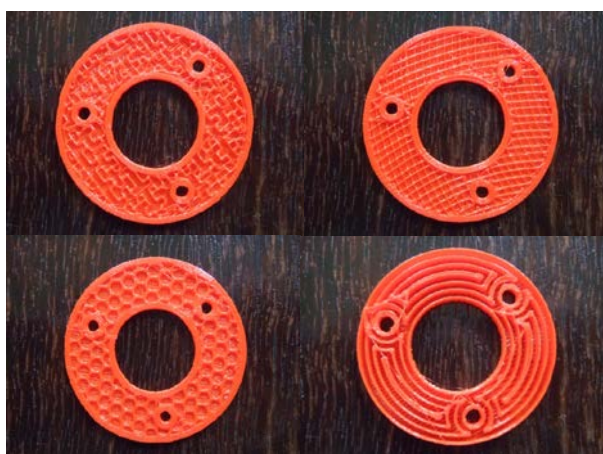
Както при всички 3D принтери, RepRap технологията е базирана на изграждане на детайлите по слоеве. Принципът, който е заложен е подобен на Fused Deposition Modeling (FDM), но поради запазена марка в този случай е прието да се използва термина Fused Filament Fabrication (FFF). Това е система състояща се от макара с полимерна нишка, която се подава чрез ролков механизъм задвижван от стълков електромотор към екструдер. Екструдерът разтапя нишката и я нанася върху предварително подгрята платформа, която се движи в направления X и Y и по този начин формира геометрията на всеки слой. След изграждането на слоя екструдерът или платформата се преместват във височина по оста Z със стъпка равна на зададената дебелина на слоя и се започва оформянето на следващия слой. Така чрез последователно добавяне и свързване на слоевете един над друг се изгражда обемно тяло.

Поради своята относително ниската температура на топене материалът, подходящ за изграждане на стопяеми/изпаряеми модели е PLA (Polylactic acid) - термопластичен полимер с

химична формула $(C_3H_4O_2)_n$. Получаването на този полимер става от царевично или картофено нишесте, захарно цвекло и други суровини, които имат високо съдържание на скорбяля. Тази пластмаса се разлага за около 12 дни при подходящо третиране.

При леенето по стопяеми модели е необходимо в етапа изгаряне на модела, възникващите напрежения във формата поради топлинното разширение на модела да са минимални. Ето защо при технологията Velerman K8200 обменните модели се изграждат с кухини (Фиг. 4), подобно на SLA технологията QuickCast на 3D Systems [8]. Това дава възможност при разширението си, моделът да навлиза в празните пространства, с което да не създава напрежения във формата. По тази причина изборът на запълване е основен елемент при работа с PLA.

В зависимост от желаната коравина, якост или приложение, управляващият софтуер предлага различни видове на запълване, както и изграждане на подпори на надвисналите участъци от модела. Предимство на големия избор на форми за запълване е и възможността за намаляване времето за изграждане, количеството на използвания материал и количеството на остатъчна пепел при изгарянето.



Фиг. 4. Различни видове запълване на обемно тяло от PLA.

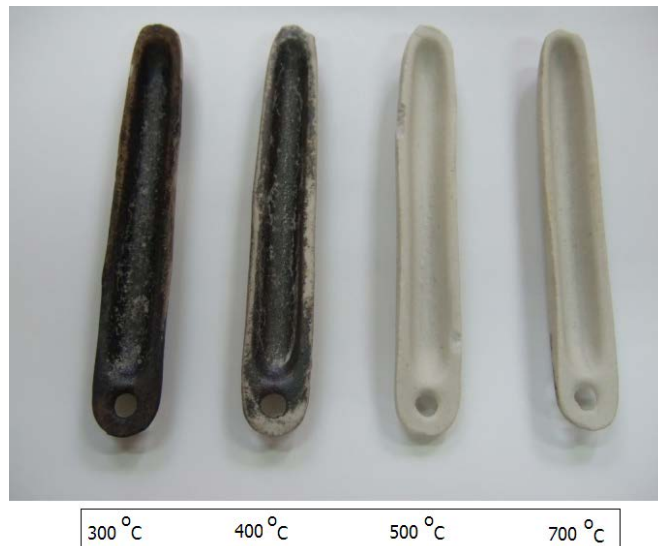
3. Изследване на изгарянето на PLA за производство на стопяеми/изпаряеми модели

С цел определяне на оптималната температура на изгаряне и количеството остатъчна пепел на използвания материал - PLA, беше проведен експеримент с помощта на пробни тела, показани на Фиг. 5. Теглото на пробните тела, при една и съща геометрия (зададена в *.stl файл) варираше, като средната стойност беше 2.39 g +/- 0.05g. Те бяха изгаряни в керамични ладии при температури в интервала 300-700 °C, като скоростта на нагряване беше 5 deg/min, а времето на задържане при крайната температура - 1 час.



Фиг. 5. Пробни тела от PLA (80x10x8mm) изработени чрез екструдирание с 3D принтер Velerman K8200 за изследване на изгарянето на материала при различни температури.

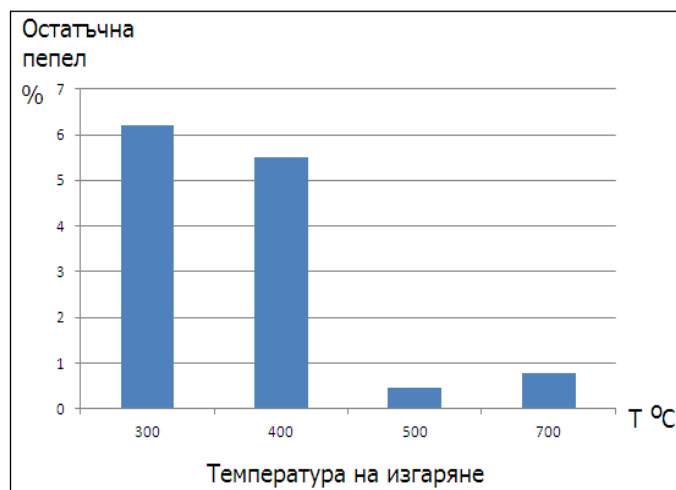
На Фиг.6 са представени снимки на керамичните ладии и измерените количества остатъчна пепел. Резултатите показват (Таблица 2 и Фиг. 7), че при температура на изгаряне 500°C се получават количества остатъчна пепел под 1%, които не се променят при допълнително повишаване на температурата. Тези стойности са съпоставими с получаваните при изгаряне на материала Castform (SLS процес на фирмите 3D или EOS) за който стойностите са от порядъка на 0.2%. Тези стойности са съпоставими с някои препоръки, които са изведени от други автори [9,10]



Фиг. 6. Изгаряне на пробни тела от PLA в керамични ладии.

Таблица 2 Резултати от изгарянето на пробните тела

Т изгаряне	300°C	400°C	500°C	700°C
Тегло на пробното тяло, g	2.43	2.23	2.32	2.58
Тегло на остат. пепели, g	0.15	0.12	0.01	0.02
% на остат. пепели	6.2	5.5	0.45	0.77



Фиг.7. Количество остатъчна пепел при изгаряне на PLA при различни температури, време на задържане – 1 час, скорост на нагряване 5 deg/min.

4. Общи изводи

Най-използваните в практиката не леене по стопяеми модели са технологиите: SLS Castform, представляващ инфилтриран с восък полистирол; SLA QuickCast, представляващ фото-полимеризиран материал на основата на различни смоли изграден с подходящи кухини. Технологията Velleman K2500 използва подобен подход за олекотяване на моделите, чрез запълване със съответна структура с шестоъгълна, квадратна форма, концентрични кухини и др.

Цените на използваните в практиката принтери са значителни, но съществува отделна област на развитието на прототипните машини, която цели масовизирането на тази технология. Тези устройства носят общото име RepRap, като цената на такъв принтер, работещ на принципа на FDM е 10 - 25 пъти по-ниска, което я прави подходяща за целите на настоящия проект.

Най-подходящата температура на изгаряне на PLA е 500 °C, при която се получават количества остатъчна пепел (под 0.8%). Тези количества не се променят съществено при допълнително повишаване на температурата. Данните са получени при време на задържане – 1 час.

5. Благодарности

Настоящата публикация е направена с финансовата подкрепа на:

ПРОЕКТ № BG051PO001-3.3.06-0008

„Подпомагане израстването на научните кадри в инженерните науки и информационните технологии”.

Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз.

6. Използвана литература

1. Minev, R. Rapid Prototyping with Vacuum Investment Casting, 'Development in Rapid Casting – Case Studies', Professional Engineering Publishing Ltd. (IMechE), ISBN: 978-1-86058-390-2, pp 92-104, 2003.
2. Minev, R. Rapid Investment Casting of Metals: some advantages and limitations of vacuum investment casting, <http://www.allbusiness.com>, D&B Small Business Solutions, April, 2002.
3. Charmeux, J-F., R. Minev, S. Dimov, E. Minev, U. Harrysson, Benchmarking of Three Technologies for Producing Castings with Micro/Meso-scale Features, *IMechE*, v.221, No4, 2007, pp. 577 - 588.
4. Upcraft, S., R.Fletcher, The Rapid Prototyping Technologies, Assembly and Automation, v.23 Iss: 4, 2003, DOI:10.1108/01445150310698634, pp. 318 - 330.
5. Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C.S. *Rapid prototyping: Principles and applications*, Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, ISBN-13: 978-9812778987, ISBN-10: 9812778985.
6. Jones, R., P. Haufe, E. Sells, P. Irvani, V. Olliver, C. Palmer, A. Bowyer. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1), 2011, pp. 177-191. doi: 10.1017/S026357471000069X.
7. Tymrak, B. M., M. Kreiger, J. M. Pearce, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 2014, pp. 242-246.
8. <http://www.quickparts.com/UserFiles/File/3D%20Systems%20Guide%20to%20Processing%20QuickCast%20Patterns.pdf> (посетен март 2015)

9. <http://www.fabbaloo.com/blog/2014/10/12/refining-the-lost-plate-burnout-process-for-3d-printed-metal-casting> (посетен март 2015).

10. <http://open3dp.me.washington.edu/2014/11/rapid-manufacturing-mk3-detailed-walkthrough-troubleshooting-guide/> (посетен март 2015).