FRI-1.417-2-MEMBT-07

INVESTIGATION AND METHODS TO REDUCE CURLING IN 3D PRINTING[8]

Ekaterin Minev, PhD
Senior Lecturer at "Angel Kanchev" University of Ruse,
Ruse, Bulgaria
Phone:+359887457893
E-mail: eminev@uni-ruse.bg

Rumen Rusev, PhD
Associate Professor at "Angel Kanchev" University of Ruse,
Ruse, Bulgaria
E-mail: rir@uni-ruse.bg

Sergey Antonov, PhD
Senior Lecturer at "Angel Kanchev" University of Ruse,
Ruse, Bulgaria
E-mail: santonov@uni-ruse.bg

Adrey Dunicov, BSc
Manager at Grate Master Ltd., Ruse
Ruse, Bulgaria
E-mail: dunitsov@abv.bg

Rusi Minev, PhD
Associate Professor at "Angel Kanchev" University of Ruse,
Ruse, Bulgaria
E-mail: rus@uni-ruse.bg

Abstract: *The paper describes the curling phenomenon and possible causes and effects of it in 3D printing. A coordinate grid method for investigation is used to quantitative measurement and consecutive analysis of the curling in 3D printing. Some measures are suggested to reduce the effect of curling. The results are illustrated on FDM RepRap printer. Further investigation and development of the grid method is also proposed.*

Keywords: *Rapid Prototyping, Accuracy, Layer Based Technology, Curling.*

JEL Codes: *L60, L63, L64*

ВЪВЕДЕНИЕ

Обемното принтиране на физически обекти се осъществява чрез последователно изграждане и съединяване на поредица от слоеве във вертикално направление. Този принцип на производство поражда възможност за един неизбежен дефект, изразяващ се в изкорубване на долната част на хоризонталните участъци от детайла - Фиг. 1. Названието на английски на този дефект е curling или warpage (Pham D. T., 2001). Тези термини са възприети и в други езици и са използвани в настоящата работа чрез думата "кърлинг", тъй като тя е широко използвана и разпознаваема в областта на 3D принтирането и в сферата на образованието.

Въпреки, че през последните години технологиите за 3D принтиране претърпяват съществено развитие, редица проблеми включително точността все още не са напълно решени (Thierry, R., & Striukova, L., 2016). Един от основните фактори, намаляващ точността на получаваните изделия, е явлението кърлинг, на което са посветени редица публикации и

[8] Докладът е представен на пленарната сесия на 28 октомври 2017 с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ НА КЪРЛИНГА И НАЧИН ЗА НЕГОВОТО НАМАЛЯВАНЕ ПРИ 3D ПРИНТИРАНЕ

дисертации (Jamal M. N., 2001), (Wang T. M. и др., 2007), (Tang Y., 2011), (Mercelis P., Kruth J. P., 2006).

Фигура 1. Примери за проява на кърлинг при детайли получени чрез 3D принтиране.

Основната причина за кърлинга е фактът, че всеки новоизграден слой се свива, докато изградените преди това слоеве вече са се свили в значителна степен. Това свиване може да се дължи на охлаждането, полимеризацията, фазов преход или друго явление в зависимост от процеса и материала. Ако причината е охлаждане от температура T_0 до T_K, то деформацията може да се изрази чрез формулата:

$$\varepsilon_T = \alpha(T_0 - T_к) \quad (1)$$

α е коефициент на линейно свиване, дефиниран чрез формулата:

$$\alpha = \frac{dl}{l.dT} \quad (2)$$

dl - промяна на дължината на материала,

l - дължина на материала,

dT - промяна на температурата, в която е измерена *dl.*

Ако процесът на 3D принтиране е проведен правилно, горният слой се съединява напълно към долните. В този случай термичните деформации в слоя, изразени чрез формула (1) са ограничени, което довежда до термични напрежения. Ако се приложи пълно ограничаване на това свиване, то напреженията могат да се изразят чрез формулата:

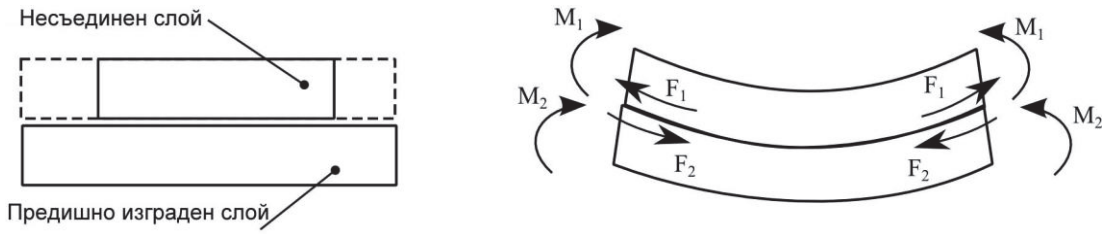
$$\sigma = E.\alpha.\Delta T \quad (3)$$

E - модул на еластичност,

ΔT - промяна на температурата.

Тъй като технологичната температура на процеса обикновено е над температурата на стъкловане на полимера, то якостта на материала е по-ниска от възникналите термичните напрежения, което води до остатъчни деформации.

Различното свиване след залепването на горния слой към долните води до напрежения, които са на опън за горния слой и натиск за долните. Схематично това е показано на Фиг. 2.



Фигура 2. Свободно свиване на неправилно изграден слой (ляво) и сили и моменти, довеждащи до кърлинг при добре прилепнали слоеве (дясно).

ИЗЛОЖЕНИЕ

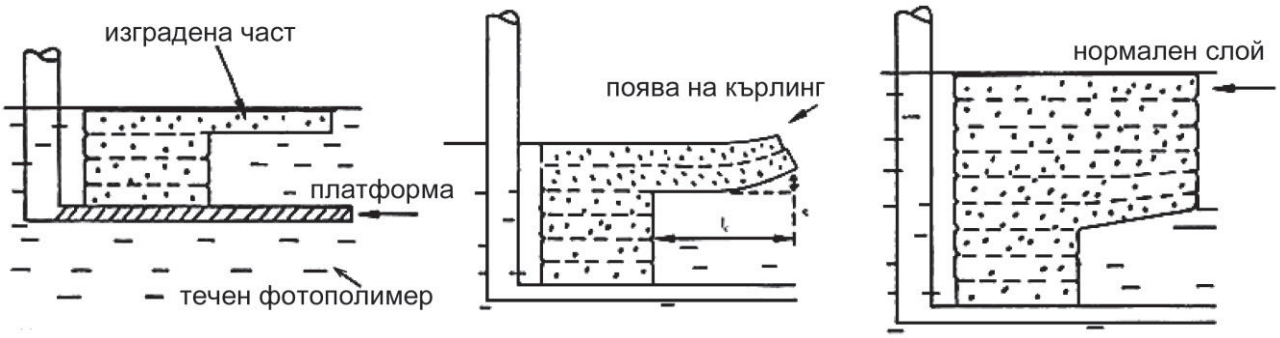
За намаляване на ефекта на кърлинг, в практиката се прилагат различни технологични прийоми.

Един от тях е допълнително залепване на първия слой към работната платформа, което не позволява неговото свиване и отделяне. С натрупването на следващите слоеве съпротивлението срещу деформиране на изградения обем се увеличава. Това води до

постепенно изчезване на кърлинга във височина на детайла. Като вторичен недостатък на този подход може да се окаже трудното отделяне на детайла от платформата. Този начин е подходящ за процеса FDM (Fused Deposition Modelling), който е в основата на 3D принтери тип RepRap (Replicating Rapid Prototype).

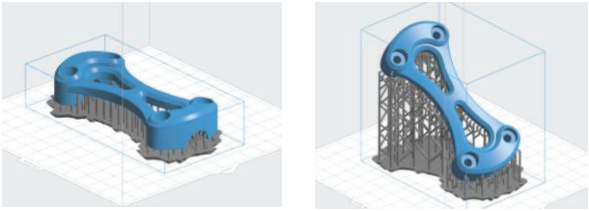
Друг подход е увеличаване на температурата на работната платформа или нагряване на цялата камера на машината. Това води до намаляване на ΔT и от там на термичните напрежения (формула 3).

Сравнително по-труден за решаване е случаят с кърлинга възникващ върху хоризонтални надвесени повърхнини във височина на изграждания детайл - Фиг. 3 (Jacobs, P. F., 1992).



Фигура 3. Стъпки при формиране на кърлинг при процес на SLA (Стереолитография).

При такава конфигурация на детайла изложените подходи, а така също и прилагането на подпорки (т. н. съпорти), обикновено не са достатъчни за елиминиране на кърлинга и се препоръчва наклонено разположение на детайла - Фиг. 4. (Armstrong, C., 2018).



Фигура 4. Изграждане на детайл под ъгъл с цел намаляване на кърлинга.

Методика и пробно тяло

Платформата на която са извършени изследванията в настоящата работа е RepRap 3D принтер Velleman K8200, която е от тип FDM. Точни данни за големината на ъгъла на наклона, който осигурява приемлив кърлинг при този вид принтери, не съществуват. Оскъдните сведения в интернет по въпроса са непълни и необосновани.

За количественото определяне на кърлинга в настоящото изследване е използвана разработената от авторите методика, описана в (Minev, E., 2012) и (Minev, E., Popov, K. и др., 2011), която е основана на изследванията на (Bredendick, F., 1969). Методиката е известна като Метод на координатните мрежи (МКМ).

Използваните пробни тела представляват призми с размер 80x10x20 mm с нанесени изпъкнали ивици в направления x и z с дебелина 0.5 mm, които определят правоъгълната координатна мрежа - Фиг. 5.

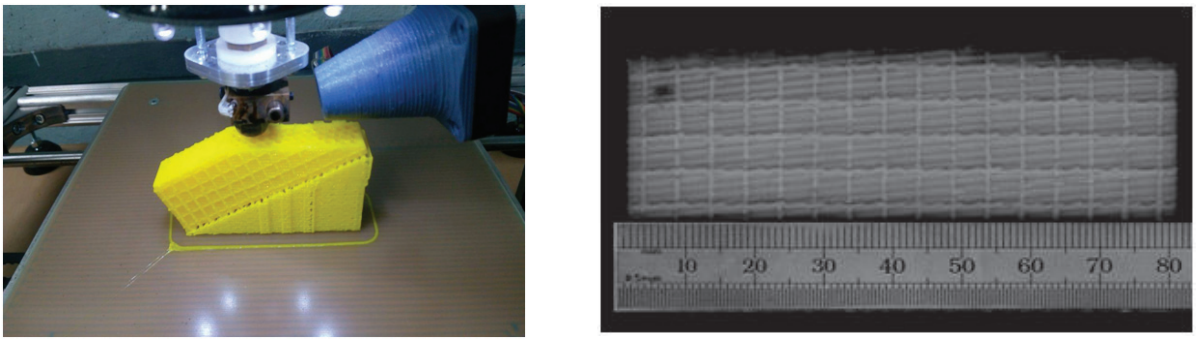
Фигура 5. Общ вид на пробното тяло.

Начин на измерване и определяне на грешката

Точките от координатната мрежа са измерени косвено чрез плосък скенер Epson Perfection 4870 Photo с резолюция 2700 pix/inch. Получаваните изображения са обработвани със софтуера Mofikis Coordinate Finder. За определяне на повторяемостта на измерването, което в този случай съдържа неизбежен субективен елемент бяха проведени двадесет измервания на няколко възела от мрежата от двама оператори. Установено бе, че разликата в позиционирането на мишката е един пиксел. Ако се пренебрегне грешката на скенера, при размер на монитора 19" и резолюция 1080 pix/inch, абсолютната грешка на измерването беше изчислена на ±0.08 mm. При диаметър на дюзата на екструдера 0.5 mm, което определя резолюцията на 3D принтера, относителната грешка на измерванията на решетка от 5 mm е 0.016 или 1.6%. Тази точност беше приета за удовлетворителна за целта на настоящото изследване.

Описание на експериментите

За определяне на кърлинга в зависимост от ъгъла на изграждане бяха произведени и измерени серия от пробни тела под наклон от 90º, 85º, 80º, 75º, 70º, 65º спрямо оста z - Фиг. 6.

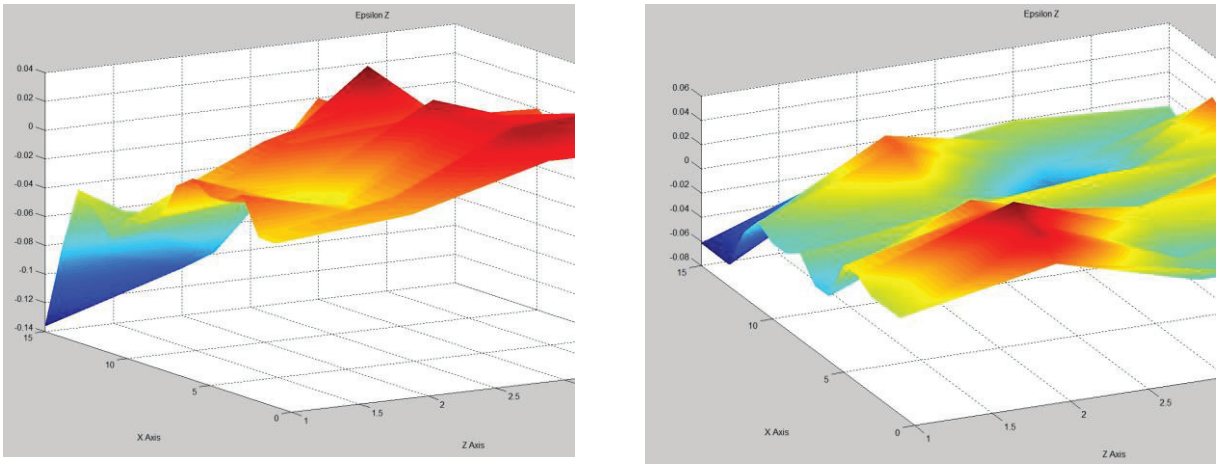


а) б)

Фигура 6. Изграждане (а) и измерване (б) на пробно тяло. Чрез линийката се определя мащабният коефициент на измерването.

Резултати

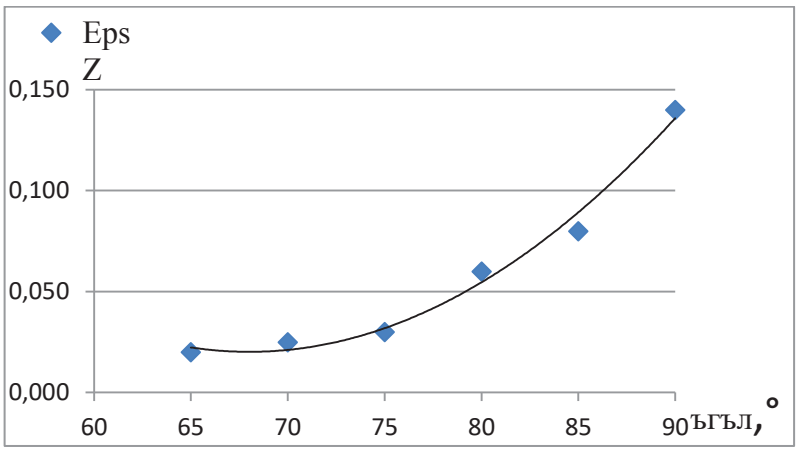
За количествен показател на кърлинга е прието отклонението от номиналния размер в мрежата по направление на оста z, което е изчислено в терминологията на линейните деформации чрез стойността на ε_z. Резултатите за пробни тела изградени под ъгъл 80° и 90° са показани на Фиг. 7, а обобщено за всички ъгли на Фиг. 8.



Тяло изградено под ъгъл 90° (ε_{max}=0.14) Тяло изградено под ъгъл 80° (ε_{max}=0.06)

Фигура 7. Разпределение на деформациите ε_z като мярка за кърлинга.

Ъгъл - ε_z
65 - 0.020
70 - 0.025
75 - 0.030
80 - 0.060
85 - 0.080
90 - 0.140



Фигура 8. Зависимост на кърлинга ($\varepsilon_{z)}$ от ъгъла на изграждане на свободната повърхнина спрямо оста z.

ИЗВОДИ

Метод на координатните мрежи може да се използва успешно за количествена оценка на дефекта кърлинг.

Наклонът, под който се изграждат детайлите, има съществено влияние върху получавания кърлинг и следва да се използва като средство за неговото намаляване върху важните от експлоатационна гледна точка повърхнини.

Оптималният ъгъл за RepRap технологията FDM на Velleman K8200 е 75° спрямо оста z (15° спрямо x). По-нататъшното увеличаване на наклона не допринася за намаляване на кърлинга, а само би довело до удължаване на общото време за изграждане.

REFERENCES

Armstrong, C., https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing [посетен на 30.01.2018 г.]

Bredendick, F. 1969. Methoden der deformationsermittlung an verzerrten gittern. *Wiss. Zeitschrift der Technical University Dresden,* v. 18, Heft 2, pp. 531-538.

Jacobs, P. F. 1992. *Rapid Prototyping & Manufacturing. Fundamentals of StereoLithography,* Society of Manufacturing Engineering. ISBN: 0-87263-425-6.

Jamal, N. M. 2001. *Finite Element Analysis of Curl Development in the Selective Laser Sintering Process*. PhD Thesis, University of Leeds.

Mercelis, P., Kruth, J. P. 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal,* 12 (5), pp.254–265.

Minev, E. 2012. *Grid Method Studies of the Geometrical Uncertainties in Free Form and Micro Processes,* PhD Thesis, Cardiff University, Available at: http://orca.cf.ac.uk/32291/ .

Minev, E., Popov, K., Minev, R., Dimov, S., Gagov, V. 2011. *Grid method for accuracy study of micro parts manufacturing.* Micro and Nanosystems (MNS), (3), pp.263-269. ISSN: 1876-4029.

Pham, D. T., Dimov, S. S. (2001). *Rapid Munufacturing. The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer-Verlag London Limited.

Tang, Y., Loh, H. T., Fuh, J. Y. H., Wong, Y. S., Lu, L., Ning, Y., Wang, X. 2004. *Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering,* Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST) 01, Available at: http://hdl.handle.net/1721.1/3898 [посетен на 21.12.2011].

Thierry, R., Striukova, L. (2016) From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. Technological Forecasting and Social Change, Volume 102, January 2016, Pages 214-224.

Wang, T. M., Jun-Tong Xi, Ye Jin. 2007. *A model research for prototype warp deformation in the FDM process.* International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, (33), pp.1087–1096.