УДК 621.77.04

М. П. Рудь, *к.т.н., доцент,*
e-mail: hochspannung77@gmail.com
О. О. Похил, *аспірант,*
e-mail: olegpokhyl@gmail.com
О. В. Лега, *магістрант,*
С. П. Бабенко, *магістрант*
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОБАР'ЄРА ЕКСТРУДЕРА ПРИСТРОЇВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ FDM

Моделювання методом наплавлення (або FDM) є найбільш поширеною технологією 3D друку. Найбільш важливим елементом FDM 3D принтера є екструдер. Екструдер призначений для транспортування та розподілення робочого матеріалу в зоні обробки. У статті проведено дослідження нагрівального блока екструдера 3D принтера. Розглянуто розроблений прототип нагрівального блока. Проаналізовано проблему теплоізоляції верхньої (холодної) частини екструдера від нижньої (гарячої). Було обрано матеріал для теплоізоляції. Розраховано математичну модель ефективності термобар'єра, який забезпечить зосередження тепла в гарячому блоці, що запобігає руйнуванню структури робочого матеріалу в каналах транспортування.

Наведено результати розрахунку математичної моделі. Показано, що розроблена конструкція термобар'єра екструдера забезпечує надійну термоізоляцію та мінімальну перехідну зону. Ефективність термобар'єра підтверджено експериментально.

Ключові слова: *3D-принтер, моделювання методом наплавлення (FDM), екструдер, метод скінченних елементів.*

Вступ. Моделювання методом наплавлення (або FDM) є найбільш поширеною технологією 3D друку [1–6]. Найважливішим елементом FDM 3D-принтера, який працює за технологією моделювання методом наплавлення термопластів, є екструдер [7, 8]. Екструдер складається з двох частин: механічної, призначеної для подачі робочого матеріалу в твердому стані у вигляді нитки (філамента), і термічної (або гарячої), призначеної для розплавлення філамента та формування з нього безперервного профілю будь-якої 3D-моделі.

Аналіз проблеми та останніх досліджень. Особливістю гарячої частини екструдера є розділення філамента на холодну й гарячу зони з мінімізацією розміру перехідної зони та максимальною ізоляцією гарячої частини від інших частин конструкції (рис. 1). Для вирішення цієї проблеми необхідно реалізувати термобар'єр між гарячою та холодною частинами [9, 10].

Це дасть можливість ізолювати інші частини конструкції екструдера і, таким чином, запобігти нагріванню, а також плавленню робочого матеріалу поза зоною гарячого блока екструдера. В існуючих FDM 3D-принтерах використовують два підходи: цільнометалевий нагрівач з охолоджуючим радіатором і примусовим обдувом та нагрівач з теплоізолюючим матеріалом.

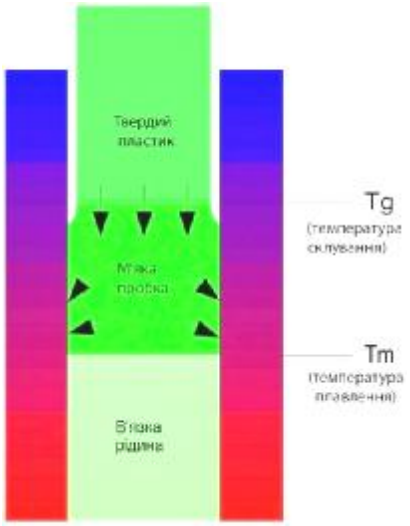


Рис. 1. Схема стану пластика в гарячій частині екструдера

Метою дослідження є виявлення ефективності термобар'єра екструдера пристроїв адитивного виробництва за технологією FDM.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дуже важливо, щоб температура від нагрівача не переносилась на верхню частину екструдера, тому що, коли філамент транспортується в блок нагрівання, він не повинен розплавитися на шляху до сопла. Тверда частина пластика виконує функцію поршня (рис. 1). М'яка частина пластика після переходу його температури точки склування виконує роль ущільнювача між поршнем і стінками циліндра, який унеможливлює зворотну подачу пластика у в'язкотекучому стані. Перехідна зона між твердим та рідким станом пластика відіграє важливу роль у роботі екструдера. Занадто велика перехідна зона призводить до збільшення сил тертя між філаментом та стінками циліндра. З другого боку, зменшення перехідної зони ускладнює нагрів пластика до температури плавлення і відповідно зменшує швидкість друку. Для вирішення цієї проблеми було встановлено термобар'єр з теплоізолюючого матеріалу, фторопласту. На рис. 2 зображено розроблену модель для розрахунку гарячої частини екструдера. Основним завданням розробки моделі є розрахувати конструкцію термобар'єра, при якій гаряча та холодна частини екструдера були б надійно ізольовані, та визначити час, необхідний для нагріву сопла екструдера до робочої температури.

Для вирішення поставленої задачі ми використовуємо метод кінцево-елементного моделювання.

Постановка задачі нестаціонарної теплопровідності

Диференціальне рівняння теплопровідності:

$$pC_p \frac{dT}{dt} + pC_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q .$$

Початкова температура t_0 = 293 К = 20ºС.

Граничні умови включають конвекційний тепловий потік від природного обдування екструдера повітрям:

$q_0 = h\,(T_{ext} - T)$,

де коефіцієнт конвекції

$h = h_{air}(L, p_A, T_{ext})$

і тепловий потік від нагрівача P = 40 Вт для розрахунку початкового нагріву екструдера або гранична умова першого роду – постійна температура нагрівача t = 220ºС.

Для високої точності розрахунку модель конструкції екструдера розбивається на кінцеві елементи (тетраедри). Після того як модель розбита на кінцеві елементи, починається процес обчислення за заданими умовами та значеннями.

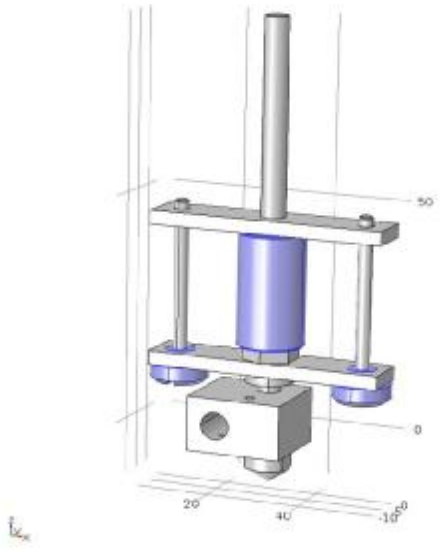


Рис. 2. Конструкція екструдера
(1 – трубка подачі філамента; 2 – фторопласт;
3 – розташування датчика температури;
4 – блок нагрівання; 5 – розташування нагрівача;
6 – робоча головка)

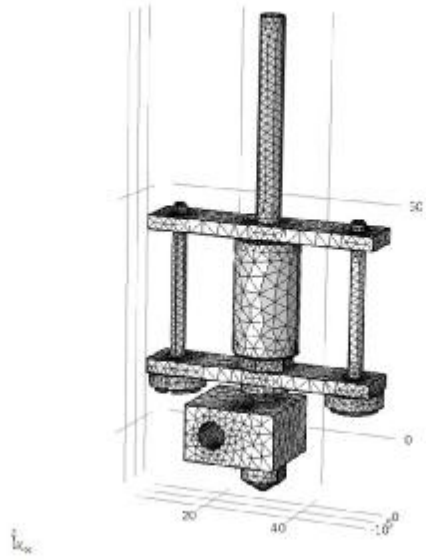


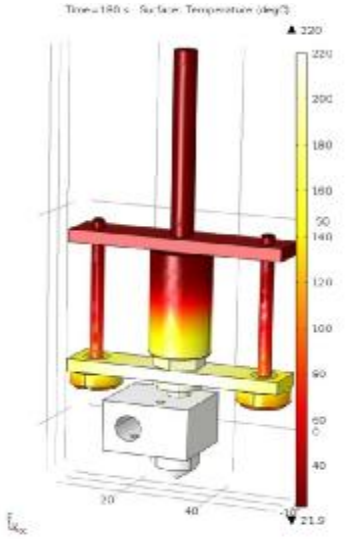
Рис. 3. Модель розбита на кінцеві елементи (тетраедри)

Після обчислення були отримані результати розрахунків у вигляді моделі передачі тепла в екструдері. На рис. 4, *а* показано, що потрібна температура t = 220ºС підтриму-

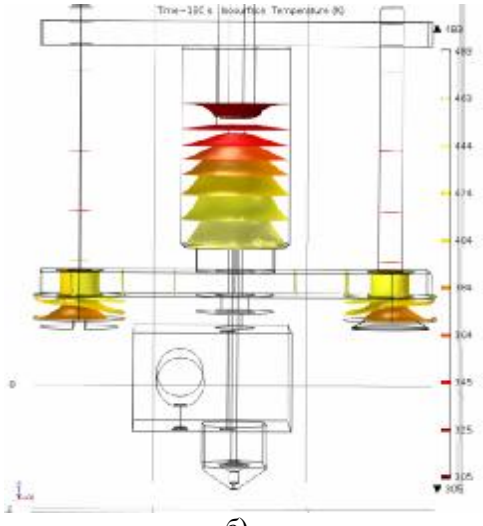
ється саме в блоці нагрівання та соплі, тобто в нижній частині екструдера. Завдяки термобар'єру з фторопласту верхня частина екструдера не нагрівається до температури плавлення робочого матеріалу що запобігає утворенню «пробки» в трубці подачі філамента. Ізотермічні поверхні, які показані на рис 4, *б*, демонструють ефективність дії термобар'єра.

Для того щоб визначити ефективність дії термобар'єра, а також точність підтримання температури в соплі, було досліджено зміну температури в чотирьох різних точках екструдера (рис. 5), а саме: на соплі екструдера (рис. 5, *а*), на датчику вимірювання температури (рис. 5, *б*), на вході в блок нагрівання (рис. 5, *в*), в зоні подачі холодного філамента (рис. 5, *г*).

На основі результатів дослідження температури в чотирьох точках екструдера для визначення ефективності дії термобар'єра було складено графіки залежності температури від часу. На рис. 6 показано, за який час температура в наших чотирьох точках досягне температури плавлення робочого матеріалу.



а)



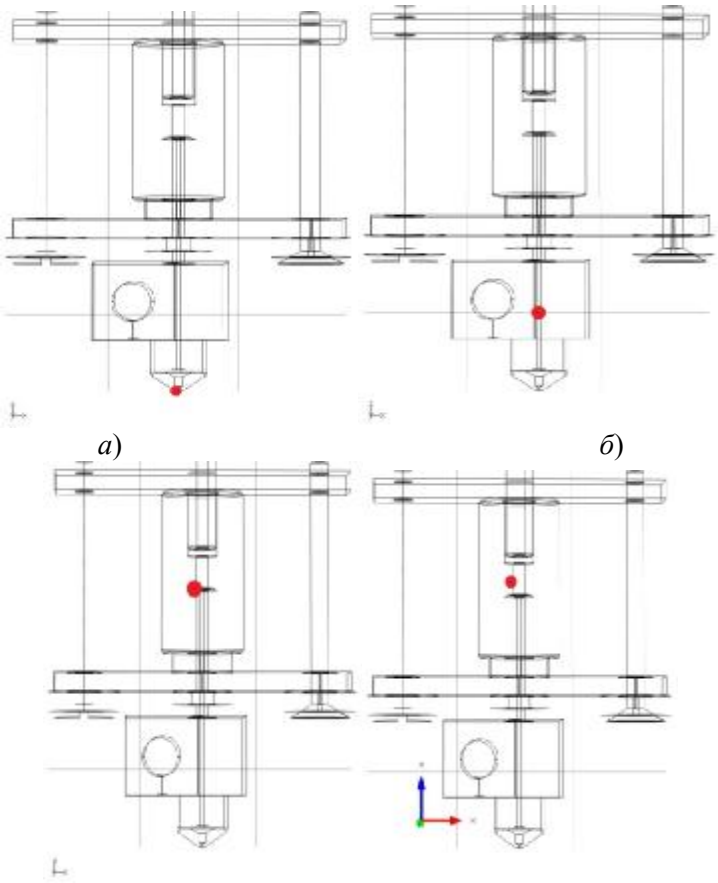
б)

Рис. 4. Результат розрахунку побудованої моделі: умова підтримання постійної температури *t* = 220ºС:
а) температурне поле,
б) ізотермічні поверхні

Температура плавлення філамента – 160-180ºС, оптимальна температура для роботи з філаментом – 220ºС. На рис. 6 ми бачимо, що оптимальна температура була досягнута в точ-

ках сопла екструдера і датчика вимірювання температури, точка входження філамента в блок нагрівання досягла температури плавлення, а в точці зони подачі холодного філамента температура не піднялась до критичного значення, що б спричинило утворення «пробки».

На стадії підтримки постійної, оптимальної для роботи з робочим матеріалом температури ми бачимо, що в зоні подачі холодного філамента підтримується безпечне для філамента середовище (рис. 7), тобто пластик залишається в твердому стані.



а) *б*)

в) *г*)

Рис. 5. Точки для визначення ефективності дії термобар'єра

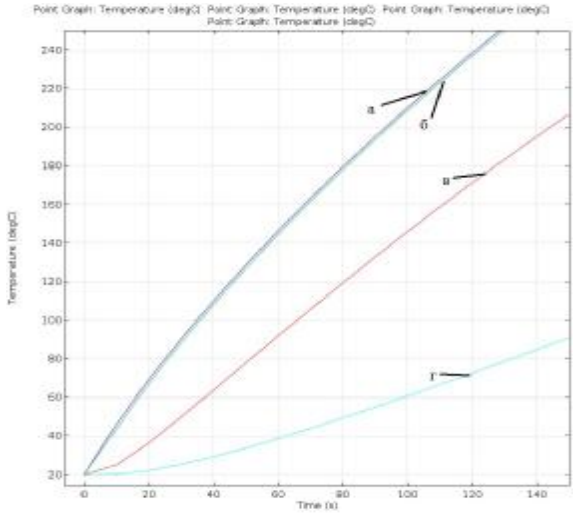


Рис. 6. Стадія нагрівання в чотирьох точках екструдера

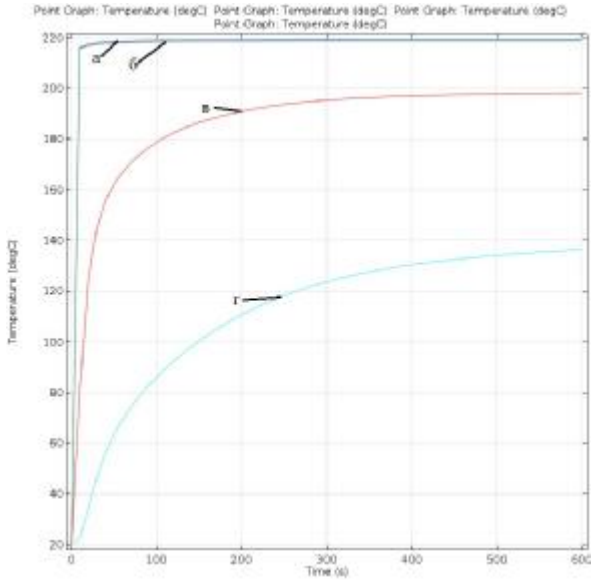


Рис. 7. Стадія підтримання оптимальної температури для роботи з філаментом

Висновки. В результаті дослідження було запропоновано конструкцію ефективного термобар'єра гарячої частини екструдера FDM 3D-принтера. Було проведено математичне моделювання теплової задачі методом скінченних елементів. В результаті моделювання було показано достатню ефективність запропонованої конструкції термобар'єра. Тривалість нагріву сопла для найбільш поширеного нагрівача потужністю 40 Вт для ABS пластика становить близько 100 с. В середній точці термобар'єра товщиною 2 мм температура склування для ABS пластика стабілізується приблизно за 400 с. За межами термобар'єра температура склування не досягається.

Список літератури

1. Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez (2015) A review of additive manufacturing. 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer New York, 498 p.
2. Krisztián Kun (2016) Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. *Procedia Engineering. International Conference on Manufacturing Engineering and Materials (ICMEM)*, June 6-10, Nový Smokovec, Slovakia, Vol. 149, pp. 203–211.
3. Omar Ahmed Mohameda, Syed Hasan Masooda and Jahar Lal Bhowmikb (2016) Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design. *Applied Mathematical Modelling*, available online 9 July 2016.
4. Chohan, J. S., Singh, R. and Boparai, K. S. (2016) Parametric optimization of fused deposition modeling and vapour smoothing processes for surface finishing of biomedical implant replicas. *Measurement*, available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.09.001
5. Singh, J., Singh, R. and Singh, H. (2016) Repeatability of linear and radial dimension of ABS replicas fabricated by fused deposition modelling and chemical vapor smoothing process: A case study. *Measurement*, available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.064
6. Alhijjaj, M., Belton, P. and Qi, S. (2016) An investigation into the use of polymer blends to improve the printability of and regulate drug release from pharmaceutical solid dispersions prepared via fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.08.016
7. Jianlei Wanga, c, Hongmei Xiea, Zixiang Wenga, c, T. Senthila, Lixin Wu (2016) A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design*, available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.078

8. Du, Jun, Wei, Zhengying, Wang, Xin, Wang, Jijie, Chen, Zhen (2016) An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts. *Journal of Materials Processing Technology*, available at: http:// dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.005
9. Turner, Brian N., Strong, Robert and Gold, Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, available at: http://dx.doi.org/ 10.1108/RPJ-01-2013-0012
10. Guo, N. and Leu, M. C. (2013) Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Front. Mech. Eng*., 8: 215, available at: 10.1007/s11465-013-0248-8

M. P. Rud', *Ph.D., associate professor,*
e-mail: hochspannung77@gmail.com
O. O. Pohyl, *postgraduate student,*
e-mail: olegpokhyl@gmail.com
O. V. Lega, *undergraduate,*
S. P. Babenko, *undergraduate*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF EXTRUDER THERMAL BARRIER FOR ADDITIVE MANUFACTURING DEVICES BY FDM TECHNOLOGY

Introduction. *Fused deposition modeling (FDM) is the most used techniques of 3D printing. An extruder is the most important element of FDM 3D printer. The extruder is designed for the transportation and distribution of working material in processing zone. In the paper heating unit of 3D printer extruder is studied. A peculiarity of extruder heating unit consists in filament separation on cold and hot zones while minimizing the size of transition zone and maximizing the insulation of hot parts from other parts of the structure.*

The purpose of scientific work *is to identify the effectiveness of extruder thermal barrier for additive manufacturing devices by FDM technology.*

Formulation of the problem. *The transition zone between solid and liquid plastic states plays an important role in the extruder. Too large transition zone increases frictional forces between the filament and cylinder walls. On the other hand, the reduction of transition zone complicates the heating to plastic melting point and therefore reduces printing speed.*

The main material. *To solve this problem thermal barrier of insulating material has been installed. The main objective of developed model is to calculate thermal barrier structure, in which hot and cold parts of the extruder would be properly insulated, and to determine the time required for heating extruder nozzle to operating temperature. As a material for thermal insulation it is offered to use PTFE. Using finite element analysis, a mathematical model of the efficiency of thermal barrier of extruder heating unit is calculated.*

Conclusions. *It is shown that designed thermal barrier of extruder provides reliable thermal insulation and minimal transition zone. The efficiency of thermal barrier is confirmed experimentally. The duration of nozzle heating for the most common heater with the power of 40 W for ABS plastic is about 100 seconds. At the mid-point of thermal barrier 2 mm thick the glass transition temperature for ABS plastic is stabilized approximately during 400 seconds. Outside of thermal barrier the glass transition temperature is not achieved.*

Keywords: *3D-printer, fused deposition modeling (FDM), extruder, finite element method.*

Рецензенти: С. В. Заболотній, д.т.н., доцент,
В. Є. Снитюк, д.т.н., професор