

АНОТАЦІЯ

Олексишен В. О. Вдосконалення обладнання для одержання полімерних виробів методом просторового друку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню процесу просторового друку, а саме впливу основних технологічних параметрів на величину міжшарової адгезії та локальну деформацію нанесеного термопластичного полімерного матеріалу в процесі охолодження, а також вивченню динаміки переміщення виконавчих органів FDM 3D принтерів в залежності від типу конструктивної схеми.

Проведено аналітичний огляд сучасного стану досліджень технології просторового друку. Розглянуто основні сучасні технології адитивного виробництва, систематизовано конструкції устаткування 3D друку термопластичними полімерними матеріалами в залежності від кінематичної схеми переміщення виконавчих органів, розглянуто типи конструкцій друкувальних головок на основі патентного пошуку, проаналізовано дослідження фізико-механічних характеристик друкованих виробів в залежності від основних параметрів 3D друку та геометрії нанесення шарів.

Проведений огляд показав, що галузь сучасного адитивного обладнання для одержання полімерних виробів надзвичайно швидко розвивається, проте підходи до конструювання нових типів обладнання не враховують властивостей витратного матеріалу. Головним завданням інженерів під час проектування є оптимізація та модернізація існуючих конструкцій. Також недостатньо вивченим є питання процесу формування готових виробів. Проведені дослідження механічних властивостей зразків не дають точних даних про величину та природу міжшарової адгезії, яка є основою адитивних технологій. Навіть в дослідженнях, що проводили випробовування на статичний одноосьовий розтяг

в поперечному напрямку до нанесення шарів, була присутня контурна стінка, а це, в свою чергу, є некоректним для встановлення величини міжшарової адгезії.

Варто зазначити, що практично не вивченим є питання поведінки розплаву термопластичного матеріалу після його виходу з друкувальної головки, а саме процес його охолодження та взаємодії з попередньо нанесеним матеріалом. Окремою прикладною темою, що також слабо вивчена, є питання динаміки руху виконавчих органів та продуктивності обладнання в залежності від конструктивної схеми.

Для моделювання процесу охолодження в роботі використано двовимірну математичну модель нестационарної теплопровідності та модель течії неньютонівської неізотермічної рідини. Для моделювання деформування шару полімеру під дією власної ваги з одночасним охолодженням після нанесення на попередній шар розв'язувалась зв'язана термомеханічна задача з урахуванням ступеневої залежності в'язкості полімеру від швидкості деформації та законом Арреніуса залежності в'язкості від температури.

Отримані результати показали, що за умов інтенсивного обдуву полімер менш ніж за 1 с встигає охолотитись до температур, нижчих за температуру текучості без помітних деформацій. Проте для недопущення короблення та розшарування виробів температура не має виходити за певні межі, що свідчить про те, що повинен бути встановлений певний мінімальний проміжок часу до нанесення наступного шару, різний для різних полімерів і розмірів шару. Це накладає обмеження на допустиму швидкість роботи 3D-принтера.

Моделювання дає змогу отримати дані про ступінь заповнення поперечного перерізу виробів, встановити причини появи дефектів та підібрати оптимальні товщини, температури та швидкості друку.

Для моделювання процесу розтягу друкованих зразків в поперечному до напрямку нанесення шарів застосовано дискретну математичну модель з використанням скінченного елемента для прогнозування деламінації нанесених шарів полімеру.

Отримані результати показали, що розшарування відбувається починаючи з країв поверхні контакту шарів за схемою крихкого руйнування.

Наведені модель та методика числового моделювання дають змогу прогнозувати міцність друкованих полімерних виробів в напрямі поперек шарів з урахуванням експериментальних даних випробувань друкованих зразків на розтяг.

Було проведено відповідні експериментальні дослідження друкованих зразків на розтяг в залежності від геометрії та технологічних параметрів 3D друку таких, як температура та швидкість друку, а також висота та довжина нанесеного шару.

Вдосконалено методику проведення відповідних досліджень та створено експериментальну установку для їх проведення, що включає механічну та електронну частини, а також створено програмне забезпечення для обробки даних. Створена установка та відповідні методики використовуються в навчальному процесі під час виконання лабораторних робіт, курсового й дипломного проектування на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Група експериментальних досліджень зразків на розтяг дала змогу встановити ряд залежностей величини міжшарової адгезії від температури та швидкості друкувальної головки, а також товщини нанесеного шару.

1. Виявлено, що існує оптимальний діапазон температур ($t_{\text{друку}} = 210...220^{\circ}\text{C}$), при якому значення міжшарової адгезії досягає максимальних значень. При температурах менших, наплавлення є достатньо слабким, а при вищих – відбувається рекристалізація полімеру, що негативно впливає на взаємодію між шарами.

2. Встановлено, що при низьких швидкостях ($V_{\text{друку}} \leq 20 \text{ мм/с}$) переміщення друкувальної головки величина міжшарової взаємодії на 8-10% нижче, ніж при оптимальних ($V_{\text{друку опт.}} = 30...40 \text{ мм/с}$), внаслідок локального перегріву шару термопластичного полімеру; при швидкостях $V_{\text{друку}} > 50 \text{ мм/с}$ поступово відбувається зрив нанесеного шару і якість зразків поступово падає. Очевидно, що швидкість друку в першу чергу впливає на час між нанесенням двох сусідніх шарів, тому найвища міцність зразків відповідає тому випадку,

коли наступний шар наноситься на стабільний в геометрії, проте ще максимально гарячий шар термопластичного полімерного матеріалу.

3. Величина міжшарової взаємодії практично незмінна для зразків з товщиною шару $\Delta_{шару} \leq 1/3d_{сопла}$, зі зростанням товщини міцність падає і при критичних значеннях ($\Delta_{шару} > 1/2d_{сопла}$) 3D друк стає неможливим. Отже з точки зору продуктивності товщин шару $\Delta_{шару} = 0,05 \dots 0,1d_{сопла}$ є нераціональними і не впливають на міцність виробів.

Також була виявлена закономірність появи дефектних зразків, міцність яких була меншою на 30 – 80% за міцність інших зразків відповідної групи. При збільшенні величини поперечного перерізу на 50% кількість таких зразків поступово падала. Це пов'язано з рядом факторів, а саме недоекструзією полімерної сировини на початку побудови нового шару, деформацією поперечного перерізу шару під час охолодження, захопленні повітря нанесеною полімерною ниткою, а також вібраціями робочої платформи та друкувальної головки, що утворюють мікропорожнини на межі двох шарів. Зі зростанням площі поперечного перерізу, питомий об'єм та вірогідність появи критичних дефектів зменшується, а отже і міцнісні та якісні характеристики зразків зростають.

Група дослідів по вивченню динаміки руху виконавчих органів, в першу чергу друкувальної головки 3D принтера в залежності від типу конструкції, дала змогу дослідити процес нанесення термопластичного полімерного витратного матеріалу, отримати данні щодо фактичної швидкості руху в кожній точці шару, виявити місця зупинки та прискорення. Було виявлено, що швидкість друку завжди менша (до 50%) за задану в виконавчій програмі і залежить від схеми переміщення друкувальної головки. Також встановлено, що зі зростанням швидкості друку відмінність між фактичним та теоретичним часом друку поступово зменшується та залежність між ними описується степеневим законом, при чому для всіх типів конструкцій.

Була запропонована методика по оцінці точності виготовлення тонкостінних крупногабаритних форм на основі знаходження поля відхилень між 3D полігональним скануванням об'єкта та базовою твердотільною формою, а також встановлена залежність між відхиленням форми та інтенсивністю охолодження.

Дослідження показало оптимальні значення режимів охолодження. При достатньо слабких значеннях відбувається надмірна деформація перерізу нанесеного матеріалу, а при критично високих, полімер показує високу усадку, що також негативно впливає на точність виготовлення.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексному дослідженні процесу формування полімерних виробів створених методом 3D друку, а саме величини, геометрії, природи міжшарової адгезії та деформації гарячого шару термопластичного полімерного матеріалу; створені методів розробки і вдосконалення процесу та обладнання FDM друку в напрямку підвищення ізотропності характеристик кінцевого виробу.

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також у ТОВ «ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА» (м. Київ, Київська обл.), що підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: 3D друк, 3D принтер, FDM, адитивна технологія, міжшарова адгезія, полімер, температура друку, швидкість друку.

ABSTRACT

Oleksyshen V.O. Improvement of equipment for producing polymer products by spatial printing.– Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

A thesis for obtaining a scientific degree of a Ph.D on specialty 133 – “Industrial Machinery Engineering”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the study of the spatial printing process, namely, the impact of the main technological parameters on the value of interlayer adhesion and local deformation of the applied thermoplastic polymer material during the cooling process, as well as the study of the dynamics of movement of the executive parts of FDM 3D printers, depending on the type of design scheme.

An analytical review of the current state of research on spatial printing technology is carried out. The main modern technologies of additive manufacturing are considered, the designs of 3D printing equipment with thermoplastic polymeric materials are systematized depending on the kinematic scheme of movement of the executive bodies, the types of designs of printheads based on patent searches are considered, studies of the physical and mechanical characteristics of printed products are analyzed depending on the main parameters of 3D printing and the geometry of the layers.

The review showed that the industry of modern additive equipment for the production of polymer products is developing extremely rapidly, however, approaches to the design of new types of equipment do not take into account the properties of consumables. The main design task for engineers is to optimize and modernize existing structures. Also insufficiently studied is the issue of the process of forming finished products. The conducted studies of the mechanical properties of samples do not provide accurate data on the magnitude and nature of interlayer adhesion, which is the basis of additive technologies. Even in the studies, static uniaxial tensile tests were carried out in the transverse direction of the application of the layers, a contour wall was present, and this, in turn, is incorrect for establishing the value of interlayer adhesion.

It should be noted that the question of the behavior of the melt of thermoplastic material after it leaves the print head, and the very process of its cooling and interaction with the previously applied material, has practically not been studied. A separate applied topic, also poorly studied, is the issue of the dynamics of motion of the executive bodies and the performance of equipment, depending on the design scheme.

To simulate the cooling process, a two-dimensional mathematical model of unsteady thermal conductivity and a model of the flow of a non-Newtonian non-isothermal fluid are used. To simulate the deformation of the polymer layer under its own weight with simultaneous cooling after deposition on the previous layer, a related thermomechanical problem was solved taking into account the power-law dependence of the polymer viscosity on the strain rate and the Arrhenius law of the temperature dependence of viscosity.

The results obtained showed that, under conditions of intensive blowing, the polymer in less than 1 s has time to cool to a temperature below the pour point without noticeable deformations. However, to prevent warping and delamination of products, the temperature should not go beyond certain limits, which indicates that a certain minimum period of time must be established before applying the next layer, it is different for different polymers and layer sizes. This imposes restrictions on the allowable speed of the 3D printer.

Modeling allows to obtain data on the degree of filling the cross-section of products, establish the causes of defects and select the optimal thickness, temperature and printing speed.

To simulate the process of stretching printed samples in the transverse to the direction of application of layers, a discrete mathematical model was applied using a limiting element based on the penalty method to predict the delamination of deposited polymer layers.

The results obtained showed that delamination occurs starting from the edges of the contact surface of the layers according to the brittle fracture scheme.

The presented model and method of numerical simulation make it possible to predict the strength of printed polymer products in the direction across the layers based on experimental data of tensile tests of printed samples.

Corresponding experimental studies of printed samples for rupture were carried out depending on the geometry and technological parameters of 3D printing, such as temperature and printing speed, as well as the height and length of the applied layer.

The methodology for carrying out the relevant studies has been improved and an experimental setup has been created for their carrying out, including mechanical and electronic parts, and software for data processing has been created. The created installation and the corresponding methods are used in the educational process when performing laboratory work, coursework and diploma design at the Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

A group of experimental tensile studies of samples allowed to establish a number of dependences of the value of interlayer adhesion on the temperature and speed of the print head, as well as the thickness of the applied layer.

1. It was revealed that there is an optimal temperature range ($t_{print} = 210... 220^{\circ}\text{C}$), at which the value of interlayer adhesion reaches its maximum values. At lower temperatures, surfacing is rather weak, and at high temperatures, polymer recrystallization occurs, which negatively affects the interaction between the layers.

2. It was found that at low speeds of movement of the print head ($V_{print} \leq 20 \text{ mm/s}$) the value of interlayer interaction is slightly lower than at optimal ($V_{print} = 30...40 \text{ mm/s}$), due to local overheating of the thermoplastic polymer; at printing speeds $V_{print} \geq 50 \text{ mm/s}$, the applied layer gradually breaks off and the quality of the samples gradually decreases. Obviously, the print speed primarily affects the time between the application of two adjacent layers, therefore the highest strength of the samples corresponds to the case when the next layer is applied on a geometry-stable but still very hot layer of thermoplastic polymer material.

3. The size of the interlayer interaction is practically unchanged for samples with a layer thickness of $\Delta_{layer} \leq 1/3 d_{nozzle}$. With increasing thickness, the strength decreases and at critical values ($\Delta_{layer} > 1/2 d_{nozzle}$) 3D printing becomes impossible. So from the point of view of the productivity of layer thicknesses $\Delta_{layer} = 0,05 \dots 0,1 d_{nozzles}$ are irrational and do not affect the strength of the products.

Also, a regularity was found for the appearance of defective samples, the strength of which was lower by 30 - 80% of the strength of other samples of the corresponding group. With an increase in the cross-sectional value by 50%, the number of such samples gradually decreased. This is due to a number of factors, namely underextrusion of the polymer raw material at the beginning of the construction of a new layer, deformation of the layer cross-section during cooling, air entrapment by the applied polymer thread, as well as vibrations of the working platform and the print head, form microcavities at the boundary of two layers. With an increase in the cross-sectional area, the specific volume and the probability of the appearance of critical defects decrease, and, consequently, the strength and quality characteristics of the samples increase.

A group of experiments to study the dynamics of motion of the executive bodies, primarily the print head of a 3D printer, depending on the type of design, made it possible to study the process of applying a thermoplastic polymer consumable, obtain data on the actual speed of movement at each point of the layer, and identify places of stopping and acceleration. It was found that the print speed is always slightly slower than the one specified in the executive program and is different depending on the pattern of movement of the print head. It was also found that with an increase in printing speed, the difference between the actual and theoretical printing times gradually decreases and the relationship between them is described by a power law, and for all types of designs.

A methodology was proposed for assessing the accuracy of manufacturing thin-walled large-sized molds based on finding the deviation field between 3D polygonal scanning of an object and the basic solid-state form, and the relationship between the deviation of the shape and the intensity of cooling was established. The study showed the optimal values of the cooling modes. At sufficiently weak values, excessive deformation of the cross section of the applied material occurs, and at critically high values, the polymer shows high shrinkage, which also negatively affects the manufacturing accuracy.

The scientific novelty of the research lies in a comprehensive study of the formation process of polymer products created by the 3D printing method, namely, the

size, geometry, nature of interlayer adhesion and deformation of the hot layer of a thermoplastic polymer material; methods have been created to develop and improve the process and equipment of FDM printing in the direction of increasing the isotropy of the characteristics of the final product.

The scientific and technical results of the dissertation work were introduced into the educational process of the Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", as well as in LLC "Tukan ENGINEERING UKRAINE" (Kiev, Kiev region), which is confirmed by the acts of implementation.

Keywords: 3D printing, 3D printer, FDM, additive technology, interlayer adhesion, polymer, printing temperature, printing speed.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях

1. The impact of 3D printing parameters on physical and mechanical properties of thermoplastic products/ Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E., Solovei V.V. *Modern engineering and innovative technologies*. Karlsruhe, Germany. Is. No.11, Part 1, pp. 9-16. Publ. March 2020.

2. Determination of geometric and kinematic characteristics of FDM 3D print process/ Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E., Solovei V.V. *Technology audit and production reserves*. 2020. No. 2/1 (52). Pp. 19-21.

3. Аналіз конструктивних особливостей та ефективності застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів/ Олексишен В.О. Вісник НТУ "ХПІ". Сер. "Нові рішення в сучасних технологіях". – 2020. - №1(3). - с. 25-34.

Апробація матеріалів дисертації на конференціях

1. Екструдер пристрою для тривимірного друку/ Олексишен В.О., Колосов О.Є., Сокольський О.Л. Івіцький І.І. *Матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конференції "АВІА-2017"*. Київ: 19.04.2017. – С. 27.92-27.93.

2. Дослідження механічних характеристик полімерних зразків, створених методом просторового друку/ Олексішен В.О., Сокольський О.Л. Соловей В.В. *Збірник доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»*. – К.: 14.12.2017. – С. 22-23.

3. Моделювання процесу охолодження шарів полімеру у виробках, які виробляються методом 3D-друку/ Олексішен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2020 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів»*. м. Луцьк, 2-4 червня 2020 р. С. 175-177.

4. Проблемні питання застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів/ Олексішен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. *Збірник доповідей IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених»*, 29 квітня 2020 р. м. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 35-38.

5. Some aspects of the additive production of thermoplastic products/ Oleksyshen V.O., Kolosov A.E., Sokolskyi A.L. Тез. доп. IV-ї міжнародної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». м. Івано-Франківськ, 01-03.04.2020. – С. 83-84.

Патенти України на корисні моделі

1. Екструдер пристрою для тривимірного друку: Пат.№117196U(UA):МПК (2006/01) B29C 47/58/ Олексішен В.О., Івіцький І.І., Сокольський О.Л.; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». u 2016 11462, 14.11.2016 Бюл. № 12/2017, 26.06.2017.

2. Екструдер пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів: Пат. № 127343 U (UA) МПК (2006/01) B29C 31/04/ Олексішен В.О.,

Колосов О.Є., Сокольський О.Л. Соловей В.В.; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»: и 2018 02156, 02. 03.2018 Бюл. № 14/2018, 25.07.2018.

3. Спосіб тривимірного друку полімерних виробів: Пат. № 131263 U (UA) МПК (2006.01) В29С 47/00/ Олексишен В.О., Колосов О.Є., Сокольський О.Л. Соловей В.В. заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»: и 2018 07435, 03. 07.2018 Бюл. № 1/2019, 10.01.2019.