

УДК 004:[681.625.9:678.01]

О.С. ПОЛІЩУК, П.Ф. ЗОЗУЛЯ, А.О. ПОЛІЩУК

Хмельницький національний університет

УЗАГАЛЬНЕНА КЛАСИФІКАЦІЯ ФІЛАМЕНТІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

В даній статті розглядаються основні різновиди полімерних матеріалів, які використовуються для 3D-друку, їх властивості та області застосування для виробництва виробів та деталей у різних галузях промисловості. Створено узагальнену класифікацію філаментів по групах залежно від механічних та технічних властивостей. Також було складено таблицю з рекомендаціями щодо використання різних філаментів для виготовлення деталей та виробів в різних галузях промисловості.

Ключові слова: філаменти, 3D-технологія, 3D-друк, полімерні матеріали.

O.S. POLISHCHUK, P.F. ZOZULIA, A.O. POLISHCHUK

Khmelnitskyi National University

GENERALIZED CLASSIFICATION OF FILAMENTS FOR 3D-PRINTING

This article is devoted to the analysis and classification of varieties of filaments used for modern 3D printing and their use in light, shoe industry, engineering and other industries. Modern inventions and developments are not in place and 3D technology is a vivid example. 3D printing is one of the most revolutionary technologies of our time and one of the forms of additive technology, where a three-dimensional object is created by applying successive layers of material. In this article we consider the most popular types of materials that are present in the modern industrial market. Many types and subspecies of additive materials for printing are described. For the first time, a 3D material classification scheme has been drawn up, which gives a complete picture and description of each type, purpose, etc. The potential of 3D technology development is really high and is capable of speeding up scientific and technological progress. Thanks to 3D printing, experts from different industries will be able to study the market as much as possible, they can prepare prototypes of products, and also create several variants of prototypes of the same product at the same time. The application of 3D printing technology in various industries is a huge leap forward, capable of solving various problems and raising it to a qualitatively new level. A generalized table of filaments has been created in groups depending on the mechanical, technical properties and applications of different manufacturers. Also, in order to facilitate the selection of filaments for printing at the product design stage, and based on the technical characteristics and application areas of the 3D filaments under consideration, a table with recommendations for their use for the manufacture of parts and products in various industries in the modern labor market was compiled.

Key words: filaments, 3D technologies, 3D-printing, polymer materials.

Вступ

У сучасному світі адитивні технології застосовуються в різних галузях промисловості. Світові тенденції періодично вражають новинами про те, як на 3D-принтері надрукували зброю, людський орган, одяг, автомобіль. Потенціал розвитку даних технологій дійсно високий і здатний на порядок прискорити розвиток наукового-технічного прогресу. Наукові лабораторії з використанням розроблених філаментів та 3D-принтерів створюють різні деталі та вироби в галузевому машинобудуванні, архітектурі, ювелірній справі, медицині, дизайні та інноваційні матеріали і тканини для виготовлення виробів легкої промисловості [1].

Постановка проблеми

Асортимент матеріалів для 3D-друку є досить різноманітним. Як правило, для друку використовуються термопластики, але є і виключення - композитні матеріали, що містять різні добавки, але створені, знову-таки, на основі термопластиків. Вихідною сировиною для створення філаментів для 3D-друку є різні полімерні матеріали такі, як гомо-, так і сополімери.

Використання 3D-пристроїв відкриває нові можливості в різних галузях промисловості, зокрема в: машинобудуванні; архітектурі; медицині; важкій, текстильній, харчовій та ювелірній промисловостях тощо. Матеріал в 3D-друку, як і в будь-якій творчій діяльності, є одним з найважливіших елементів. Від матеріалу залежать не тільки механічні та хімічні властивості майбутнього виробу, але і його естетична цінність. І для того щоб вибрати потрібний матеріал для 3D-друку для досягнення тієї чи іншої задачі необхідно розібратися які є види філаментів, які вони мають властивості та умови експлуатації і як вони співвідносяться з потребами, якістю і способом друку, матеріальною сферою і застосуванням. Щоб знайти відповідь на ці та інші запитання потрібно розглянути основні види 3D філаментів та їх технічні характеристики. Тому у даній статті в подальшому буде проведено детальний огляд філаментів для 3D-друку, що випускаються різними виробниками, їх властивостей та сфер застосування.

Метою статті є складання узагальненої класифікації філаментів для 3D-друку по основних групах їх призначення, зведення характеристик, що їх характеризують в єдину таблицю та надання рекомендацій по вибору 3D пластиків для виготовлення певних виробів або деталей.

Виклад основного матеріалу

Сучасні системи 3D-друку дозволяють швидко і якісно вирішувати широке коло завдань, що стоять перед інженерами, конструкторами, технологами в машинобудівній галузі та легкій промисловості. 3D-принтери стають незамінними як на етапі створення концептуальних зразків, так і для виробництва готових виробів.

Усі витратні матеріали діляться на дві групи: матеріали для 3D-друку по технології FDM та матеріали для 3D-друку по технології SLA. Технологія FDM є найбільш популярною, тому вибір матеріалів

для 3D-принтерів найбільш широкий. Тому більш детально в даній статті будуть розглянуті саме матеріали для FDM 3D-друку.

В залежності від спеціалізації матеріали для FDM 3D-друку можна також розділити на декілька груп, кожна з яких призначена для виконання певних технологічних задач.

1. *Філаменти загального призначення.* Використовуються для створення виробів, які не знаходяться під дією значних механічних, термічних та інших видів навантаження і які використовуються найчастіше.

До філаментів загального призначення можна віднести найбільш поширені на ринку України 3D пластик ABS та PLA.

3D пластик ABS (акрилонітрілбутадієнстирол). Один із самих популярних матеріалів для FDM 3D-друку. Даний тип пластику виготовляє багато виробників, зокрема це фірми: MonoFilament (Україна), 3Dplast (Україна), 3DDevice (Китай), Verbatim (Китай) тощо. Але пластик різних виробників різниться між собою розбіжністю основних технічних характеристик. Даний матеріал краще за інші матеріали піддається механічній і хімічній обробці. Дозволяє здійснювати друк на високій швидкості.

Основні властивості: ударостійкість, жорсткість, термостійкість, довговічність, вологостійкість; стійкість до деяких кислот та олів, розчинність в ацетоні, має широкий діапазон експлуатаційних температур готової продукції (від -40°C до $+90^{\circ}\text{C}$). Основними недоліками є: нестійкість до органічних розчинників, низька світлостійкість, необхідність підігрівати платформу, щоб не допускати деформації моделей при 3D-друку.

Застосовується для виготовлення: корпусів, кріплень та деталей для різної техніки; механічних деталей, які працюють без значних навантажень; інтер'єрних та екстер'єрних деталей автомобілів; декоративних і декоративно-прикладних виробів; збірних габаритних виробів, підставок, контейнерів і т.п. Завдяки своїм властивостям є вдалим матеріалом для прототипування.

3D пластик ABS +. Це нова полімерна монопітка, розроблена для більш якісного 3D-друку. Модифікована формула пластику ABS + має ряд переваг у порівнянні зі звичайним пластиком ABS.

До його переваг порівняно з пластиком ABS можна віднести: кращу адгезію шарів; прилипання навіть до холодного столу; більш високу міцність; стійкий до дії кислот; довговічність; вологостійкість готових виробів; не токсичність; меншу усадку в процесі друку і т.п. Більш низька температура друку, дозволяє уникнути проблем прилипання до основи, деламінації і деформації готової моделі, що в свою чергу впливає на якість готових виробів, відповідає заданим розмірам, габаритам і формі [2].

3D пластик PLA (полілактид). Другий за популярністю матеріал для FDM 3D-друку. Екологічно чистий, біорозкладний пластик на основі полімерів молочної кислоти. Використовується для виробів з підвищеними санітарними вимогами, а також з високими вимогами до точності і деталізації. Добре піддається механічній обробці, але поступається в цьому пластику ABS. Даний тип пластику виготовляє багато виробників, зокрема це фірми: MonoFilament (Україна), 3Dplast (Україна), 3DDevice (Китай), Verbatim (Китай) тощо. Але пластик різних виробників різниться між собою розбіжністю основних технічних характеристик. Наприклад пластик PLA фірми 3DDevice має зовнішній вигляд з ефектом шовку.

Основні властивості: не токсичність та безпечність (відсутність виділення токсинів при друку не наносить шкоди здоров'ю людини); біорозпадність; економічність під час друку, завдяки низькій температурі плавлення матеріалу, відсутність деформації під час охолодження; збереження насиченості кольорів тощо [2]. При використанні при друку пластиків PLA Lowcost, PLA Silk можливою є відсутність нагрівання платформи завдяки їх кращим адгезійним властивостям прилипання до робочої поверхні.

Застосовується для виготовлення: дитячого та одноразового посуду; дитячих іграшок; предметів медичного призначення; художніх й декоративних виробів, які не потребують після друкарської обробки; харчової упаковки, ємностей для харчових продуктів (наприклад холодильних камер) і медичних препаратів; сувенірів; плафонів; деталей холодильних камер; виробів в різних дизайнерських проектах тощо. Його використовують також для друку різних прототипів виробів, які експлуатуються протягом тривалого проміжку часу.

3D пластик PLA+. По суті являє собою оптимізований PLA пластик з покращеними властивостями. Він відрізняється підвищеною міцністю та тим, що краще переносить механічні дії. Крім того, пластик PLA + більш стійкий до розтріскування. Такий ефект досягається за рахунок включення до складу матеріалу допоміжних біо-поліефірних сумішей. Незважаючи на це, пластик не втратив основних властивостей PLA і залишився безпечним і нетоксичним. Пластик не схильний до основних проблем «батьківського» матеріалу і підходить для всіх моделей 3D-принтерів, що працюють по технології FDM друку [3].

2. *Технічні пластики.* В основному пластики даної групи застосовуються для виготовлення деталей механізмів, конструкційних елементів і інших високоміцних та зносостійких виробів. Технічні пластики, що виготовляються та набули широкого використання при 3D-друку відповідно за їх технічними характеристиками та властивостями можна розділити на дві групи I - міцні та II - гнучкі.

До I групи можна віднести наступні типи філаментів: PET, PETG, PC, PBT, Nylon, PEEK, Carbon Fiber, CoPET, POM, PP. В свою чергу до II групи можна віднести: Elastan, Plastan, Filaflex, Primalloy, TPU, ColorFabb.

Розглянемо технічні характеристики та сфери застосування філаментів, що віднесені до I групи.

3D пластик PET (поліетилентерефталат або поліестер). Один з найпоширеніших термопластиків в промисловості, який знайшов застосування і в 3D-друку. Застосовується для виробів, що контактують з

харчовими продуктами [3].

Основні властивості: міцність; еластичність; в'язкість; зносостійкість; термостійкість; стійкість до більшості кислот; хороший діелектрик. Використовується для виготовлення: зубчастих коліс і деталей механічних передач; конструкційних елементів, які піддаються динамічним навантаженням; ємностей для харчових продуктів і посуду; світло пропускну елементів; корпусів техніки; декоративних напівпрозорих виробів; електромонтажної фурнітури; різних медичних ємностей тощо.

3D пластик PETG. Це модифікована версія пластика PET. За рахунок додавання в основну речовину (поліетилентерефталат) гліколю на виході виходить абсолютно новий матеріал з іншими властивостями. PETG не піддається кристалізації при нагріванні, оскільки володіє більш аморфною структурою. Це технічний пластик, який перевершує за характеристиками розглянуті вище пластики PLA і ABS. Хоча за властивостями він ближче до пластика ABS. Він практично не схильний до усадки і деформації при охолодженні, відрізняється високою механічною міцністю, жорсткістю і стійкістю до дії широкого діапазону температур. Матеріал довговічний і має високу ударну в'язкість. Цей пластик визнаний безпечним при контакт з харчовими продуктами.

Всі особливості, перераховані вище, роблять його оптимальним варіантом для самих різних застосувань. За рахунок високої ударної в'язкості PETG є незамінним матеріалом для виробництва виробів, що піддаються механічному впливу. А завдяки високій прозорості він підходить для створення декоративних виробів. Прекрасні механічні властивості роблять PETG ідеальним для технічної сфери, де він має застосування.

3D пластик PETG Clear. Це прозорий пластик, що є різновидом пластика PETG. Традиційно даний пластик використовується для виготовлення пластикових пляшок та інших харчових ємностей. Він має високу ступінь прозорості, міцності і легкості. Готові вироби прозорі, як скло і легко піддаються механічній обробці.

Пластик CoPET (поліетилентерефталат). Це модифікована версія пластика PET. Це новий зміцнений матеріал, що представляє собою міцний, вогнестійкий аморфний матеріал з гладкою поверхнею та має високу ступінь прозорості з рівномірним світлорозсіюванням. CoPET являється єдиним пластиком, який може піддаватися деформації в холодному стані без утворення тріщин. Це оптимізований матеріал, який підходить для 3D-друку на більшості настільних 3D-принтерів. Готові вироби з пластика CoPET відмінно реагують на механічну обробку (свердління, шліфування, фарбування, лакування та ін.). Діапазон експлуатаційних температур – від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$. Може бути підданий загартуванню, після якого максимальна температура експлуатації підвищується до 220°C .

Основними перевагами даного пластика є: ударостійкість; довговічність; зносостійкість; не розчинність у воді; стійкість до соляних і лужних розчинів, жирів і олів; відсутність внутрішніх пор у матеріалі; глянцева поверхня готових виробів; висока адгезія між шарами; відмінне прилипання до столу; вироби не тріскають після друку; не токсичність. Використовується для виготовлення: пляшок для води і газованих напоїв; виробів технічного призначення, однією з вимог до яких буде рівномірне пропускання світла.

3D пластик PC (полікарбонат). Один з найбільш міцних матеріалів для FDM 3D-друку. Використовується для виготовлення високоміцних виробів, що працюють під високим навантаженням. Більш твердий і міцний, ніж PET, але менш в'язкий.

Основні властивості: висока міцність; твердість; пружність; зносостійкість; термостійкість; довговічність; стійкість до кислот; екологічність. Використовується для виготовлення: зубчастих коліс і деталей механічних передач; конструкційних елементів, що працюють при статичних навантаженнях; захисних споряджень; світло пропускну елементів; харчових контейнерів; захисних окулярів; удароміцного скла тощо.

3D пластик PBT (полібутилентерефталат). Це полімер, що кристалізується та відноситься до складних насичених полієфірів. Набув широкого поширення як конструкційний пластик. Використання полібутилентерефталата як конструкційного термопластичного матеріалу пов'язано з його базовими властивостями і можливістю різноманітної модифікації матеріалу.

3D пластик Nylon (нейлон). Один з найбільш привабливих матеріалів для 3D-друку технічних виробів. Nylon (PA6) відноситься до конструкційних (інженерних) полімерних матеріалів. Це жорсткий пластик, що кристалізується та має високу міцність на розрив і стійкість до зносу. Відрізняється високою температурою розм'якшення і еластичністю при низьких температурах, витримує стерилізацію паром, розігрітою до 140°C . Це дозволяє використовувати його в умовах з температурними перепадами в широкому діапазоні.

Використовується в промисловості для виробництва деталей, що працюють під високим навантаженням, а також для виготовлення високоміцних тросів, тканин, струн музичних інструментів. В легкій промисловості використовується для виробництва деталей одягу. Має високі трибологічні властивості - низький коефіцієнт тертя і стійкість до абразивного зносу, що дозволяє застосовувати нейлон в парах тертя. Це оптимальний варіант для його найрізноманітніших застосувань.

Основні властивості: висока міцність, в тому числі на розрив; гнучкість; еластичність; зносостійкість. Має виняткові антифрикційні властивості. Застосовується для виготовлення: зубчастих коліс і деталей механічних передач, що працюють на високих оборотах, в тому числі деталей пар тертя; конструкційних деталей, що працюють в режимі динамічного та статичного навантаження; пластикових

деталей механізмів автомобіля (заслінки, важелі, втулки, шестерні); захисних контейнерів, електромонтажної фурнітури; елементів одягу тощо.

3D пластик PEEK (поліефірефіректон). Завдяки своїм унікальним властивостям PEEK володіє багатьма перевагами перед іншими полімерами і може бути використаний як заміна металу. До матеріалу PEEK може застосовуватися різний дизайн, і він, на відміну від металу, не піддається дії корозії. Низька щільність (в два рази менша, ніж у алюмінію) дозволяє знизити вагу будь-якої моделі.

Основними його властивостями є: можливість витримування високих тисків, відмінна фрикційна поведінка, низька займистість, відмінна міцність, жорсткість та хімічна стійкість. Є відмінним діелектриком [3].

Таким чином, PEEK застосовується в таких галузях як автомобілебудування, електроніка, напівпровідники, машинобудування тощо. У FDM 3D-друку, PEEK особливо підходить для виробництва дрібними серіями, або для виробництва спеціального дизайну, прототипів. В машинобудуванні та автомобільній індустрії можна використовувати для виготовлення підшипників кочення і ковзання, клапанів, упорних шайб, поршневих кілець, ізолюючих шарів, шестерень, втулок, корпусів насосів, дозуючих поршнів, лампових патронів, електричних вилок. Завдяки тому, що даний матеріал є тугоплавким, не виділяє газів, може бути ізольованим або проводити електрику, його можна використати для виготовлення виробів та деталей в галузі напівпровідників і електротехніки. Завдяки своїй теплостійкості та удароміцності є незамінним матеріалом для багатьох галузей промисловості.

3D пластик Carbon Fiber. Це унікальний матеріал на основі полімеру з додаванням вуглецевого волокна. За рахунок цього на виході отримується міцний і легкий полімер. Завдяки меншій вазі вироби із даного матеріалу можуть використовуватися в якості аналогів готових виробів там, де необхідно їх полегшена версія. В плані ваги карбоновий пластик значно виграє в порівнянні з традиційними матеріалами [3].

Основні властивості: висока міцність, стабільність; стійкість до механічних впливів; невелика вага виробу при високій жорсткості; мала усадка; стійкість до дії УФ-випромінювання, температурного і механічного впливу. Застосовується для виготовлення: різних інженерних деталей; виробів радіо- і електротехніки; екранів, що поглинають електромагнітне випромінювання; деталей кузовів і салону автомобіля; ексклюзивних деталей збірних велосипедів тощо.

3D пластик Carbon Fiber XT-CF20. Це різновидність 3D пластика Carbon Fiber. Це перша розробка від Європейської компанії ColorFabb, призначена для виготовлення деталей високої жорсткості. Даний пластик представляє собою об'єднання вуглецевого волокна (20%) і композитного матеріалу на основі складного сополієфіру. Таке поєднання забезпечує високу міцність, невелику вагу і приємну матову поверхню друківаних виробів.

Основні властивості: висока ударна в'язкість; висока міцність розплаву; високий модуль пружності на згин (в 2 рази перевищує аналогічне значення для PLA пластику); помірне видовження на розрив; висока температура скловання; добра розмірна точність і стабільність. Використовується для виготовлення: функціональних модулів і прототипів; різних готових виробів.

3D пластик POM (поліацеталь). На відміну від інших пластичних мас, поліацеталь поєднує високу жорсткість і достатню твердість полімерного моноліту з хорошою стійкістю до динамічних, особливо до ударних навантажень. Він не втрачає своїх властивостей і при низьких температурах.

Основними перевагами даного філаменту є: висока міцність, в'язкість, жорсткість; зносостійкість; стійкість до різних олив, тертя і ударних навантажень; нешкідливість. Перевершує за своїми фізико-механічними властивостями NYLON. Застосовується для виготовлення: різних виробів технічного призначення; високоміцних деталей з низьким коефіцієнтом тертя; шестерень, вкладишів підшипників ковзання; деталей авто; корпусів електроприладів, електротехнічних деталей і арматури; волокон; виробів для харчового обладнання і медицини тощо.

3D пластик PP (поліпропілен). Це один із найбільш популярних видів пластику в промисловості. Він активно застосовується для виготовлення посуду і будь-яких механізмів, які так чи інакше причетні до процесу приготування їжі (механізми, форми, упаковки і т.п.). Крім того, даний пластик незамінний для виготовлення дитячих іграшок. Відрізняється високими механічними характеристиками.

Основні властивості: висока ударна міцність під час розтягування; твердість; надійність; довговічність; гнучкість й еластичність; низька паро-, газопроникність; стійкість до впливу кислот, лугів і органічних розчинників, перепаду температурних режимів, багаторазових згинів та УФ-випромінювання; невелика маса; висока ступінь прозорості. Використовується для виготовлення: посуду; упаковки для їжі; пляшок; кухонних та побутових виробів.

Розглянемо технічні характеристики та сфери застосування філаментів, що віднесені до II групи.

3D пластик Elastan (еластан). Основною особливістю даного матеріалу є його висока еластичність, чого бракує більшості інших матеріалів. Матеріал має ефект пам'яті форми, тобто здатність повертатись до своєї вихідної форми після деформації та високу зносостійкість, що прекрасно підходить для виготовлення предметів одягу, в тому числі взуття. Також даний філамент застосовується майже у всіх сферах промисловості [2].

Основні властивості: пружність; еластичність; ударостійкість; міцність на розрив; гнучкість; стійкість до водної ерозії, УФ-випромінювання, радіації, розчинників і палива [2]. Застосовується для виготовлення: демпферних, герметизуючих, антивібраційних елементів деталей механізмів і обладнання; захисних еластичних протиударних контейнерів, чохла, накладок; елементів протиковзання; декоративних

та декоративно-прикладних виробів.

3D пластик *Plastan (пластан)*. Це прозорий пластик з аморфною структурою полімеру, з характерними пластичними властивостями. Відрізняється високою еластичністю при високій міцності. Добре піддається механічній обробці. В процесі друку відсутня деформаційна усадка, відсутнє короблення і деламінація.

Основні властивості: пружність; гнучкість; пластичність; термостійкість; стійкість до УФ-випромінювання, радіації та розчинників. Застосовується для виготовлення: повнотілих зубчастих коліс і деталей механічних передач; ущільнюючих і компресійних елементів механізмів (прокладок, кілець вставок і т.п.); демпферних і вібро-погасаючих елементів; захисних еластичних міцних контейнерів, чохла, накладок і упаковки; елементів протиковзання [2, 4].

3D пластик *Filaflex*. Це пружний еластичний матеріал, що дозволяє створювати гнучкі деталі для багатьох галузей промисловості. Його особливістю є те, що він не втрачає форму при розтягу і має високу міцність на розрив.

Основні властивості: стійкість до механічних навантажень; висока міцність на розрив; не втрачає форму при розтягуванні; не руйнується розчинниками; не вступає в реакцію з різними оливами, має високу зносостійкість. Застосовується для виготовлення: предметів одягу, взуття, шкіргалантерейних виробів; аксесуарів годинників; складних 3D-моделей в комбінації із звичайним PLA пластиком.

3D пластик *Primalloy*. Це м'який гумовий матеріал на основі поліестера з підвищеними показниками термостійкості, механічної міцності, стійкості до стирання, дії олів і нафтопродуктів. Це високопродуктивний поліефірний матеріал на основі термопластичного еластомера (ТПЕ), який складається із суміші кристалічного поліефірного блоку (в основному ПБТ полібутилентерефталат) і тонкого шару поліефірного блоку (в основному політетраметиленафіргліколь). Ця суміш надає деталям, надрукованих даним пластиком, унікальну гнучкість без втрати міцності. Він міцний термопластичний еластомер (ТРЕЕ), що відрізняється більшою міцністю і еластичністю порівняно з традиційними термопластичними еластомерами. Виключно точний діаметр і однорідна структура пластикового волокна забезпечують плавну роботу з матеріалом.

Основні властивості: еластичність; висока механічна міцність; зносостійкість; однорідність матеріалу. До недоліків даного пластика можна віднести те, що пластик під час друку виділяє специфічний запах, а перед початком друку потрібно покривати платформу поліамідною плівкою, а саму деталь після закінчення друку охолоджувати за допомогою кондиціонера. Застосовується для виготовлення гумових виробів, гнучких деталей в різних галузях промисловості.

3D пластик *TPU (термопластичний поліуретан)*. У традиційній промисловості це досить поширений матеріал, який застосовується для виготовлення широкого спектру різних виробів. У 3D-друк пластик TPU прийшов відносно недавно, і ще не встиг набути достатню популярність. Проте, за своїми фізичними і механічними властивостями цей полімер дуже цікавий. Він досить міцний при високій гнучкості, а при охолодженні практично не дає усадки. Є одним із видів гнучких 3D-пластиків і підходить для застосування в різних моделях 3D-принтерів. Цей матеріал практично не розшаровується, має прекрасну адгезію між шарами. Однак через високу гнучкість 3D-друк може вимагати певних зусиль і особливих налаштувань 3D-принтера.

Основні властивості: стійкість до стирання; зносостійкість; пружність і еластичність; стійкість до олів; витримує низькі температури. З недоліків полімеру можна відзначити складність в обробці після виготовлення (він практично не піддається шліфуванню, фарбуванню і т.п.). Застосовується для виготовлення гнучких і одночасно міцних деталей, які витримують температуру навколишнього середовища до 80 °C.

3D-пластик *ColorFabb XT Clear*. Це чудова альтернатива PLA пластику. Даний пластик можна використовувати навіть на 3D-принтерах без підігріву столу. Основним компонентом даного пластику є пластик PETG, який характеризується величезною довговічністю і високою температурою плавлення. Матеріал володіє певною еластичністю, що залежить від товщини. Якщо надруковану деталь гнути, але не ламати, то вона повернеться до колишньої форми. Поверхня моделей виходить трохи глянцевою, що може бути вельми привабливим в ряді випадків.

Основні властивості: висока жорсткість; прозорість; міцність; має термоусадку подібну до пластика PLA, можливість друку на холодній платформі, стійкість до високих температур (не боїться високих температур у побуті). Застосовується для виготовлення виробів для побутових цілей та харчових ємностей.

3. Специфічні матеріали. Це група унікальних 3D філаментів, які мають властивості не притаманні звичайним пластикам. До даної групи можна віднести наступні види 3D матеріалів: T-Glase; ABS Conductive; PET пластик флуоресцентний; полілактокапрон PLC; 3D пластик вогнетривкий; Color Changing Filamet.

3D пластик *T-Glase*. Це якісний матеріал для 3D-друку американського виробництва. Пластик для 3D-принтера T-Glase є низькотемпературним матеріалом з високим ступенем прозорості, а також з високою жорсткістю. Даний пластик може контактувати з продуктами і може застосовуватися для виготовлення харчових контейнерів. При цьому під час 3D-друку матеріал не виділяє запаху і парів.

Основні властивості: висока міцність та прозорість; низька усадка, нетоксичність та безпечність; можливість переробляти пластикові відходи в нову пластикову нитку. Застосовується для виготовлення:

деталей для різних інженерних задач і створення функціональних елементів; харчових контейнерів; емностей для рідини і їжі.

3D пластик PET флуоресцентний. Це якісний матеріал для 3D-друку.

Основні властивості: підвищена міцність; довговічність і зносостійкість; не токсичність; вологостійкість; теплостійкість; стійкість до дії кислот та олив; розчинність в ацетоні. Недоліками є: нестійкість до органічних розчинників, низька світлостійкість, низька адгезія між шарами деталі, погано переносить вплив ультрафіолетового випромінювання. Застосовується для виготовлення різних промислових і міцних деталей.

3D пластик ABS Conductive. Це високоякісний матеріал, який проводить електричний струм і має антистатичні властивості. Він має в своєму складі стандартну основу, але до неї додаються електропровідні компоненти і вуглецеві волокна.

Основні властивості: струмопровідність 1000 Ом/см; відмінна механічна та ударна міцність; опір до високих і низьких температур; друк звичайними налаштуваннями ABS пластика. Застосовується для виготовлення різних промислових і електропровідних деталей та для екранування електромагнітних перешкод.

3D пластик PLC (полікапролактон). Це новинка в 3D-друку, що володіє нетиповими для цієї сфери властивостями. 3D пластик має незвичайні властивості. За рахунок високої еластичності і низької температури плавлення він може використовуватися в якості матеріалу для ліплення. 3D пластик PLC є біорозкладним фотополімером, що представляє собою величезний інтерес для медичної промисловості. Він повністю розкладається під впливом ультрафіолетового освітлення, високих температур, мікроорганізмів і радіації. Підходить для використання в 3D-ручці.

Основні властивості: еластичність; біорозкладність; екологічність і безпечність; не міцний. Застосовується для виготовлення: одягу і взуття; харчових контейнерів і інших елементів, які передбачають тісний контакт з людським організмом.

3D пластик вогнетривкий. Даний пластик являє собою модифікований ABS з домішками спеціальних речовин, що забезпечують матеріалу захист від вогню. Він гасне протягом 10 секунд після усунення джерела вогню. Він стане прекрасним вибором для виробництва різних виробів, що вимагають вогнетривкості. У домішках, що додаються в 3D пластик, не міститься галогену. За характеристиками вогнетривкий пластик практично не відрізняється від звичайного ABS. У 3D-друку вогнетривкий ABS пластик може викликати певні складнощі. При необхідності можна використовувати спеціальний клей для ABS.

Основні властивості: висока між шарова адгезія; відмінна якість та гладка поверхня 3D-друкованих виробів. Використовується для виготовлення вогнетривких виробів для різних галузей промисловості.

3D пластик Color Changing Filamet. Даний пластик має відмінні термічні властивості. Він здатний змінювати колір під дією температури. Використовується для виготовлення: виробів у різних дизайнерських проектах; декоративних виробів і елементів декору; термостійких деталей для різних галузей промисловості.

4. Декоративні пластики. Це група пластиків, розроблених спеціально для виготовлення декоративних виробів. Деякі з них дозволяють імітувати традиційні матеріали (бронза, дерево, алюміній і т.п.). Декоративні пластики можна розділити на дві групи: I – дерев'яні пластики; II – металізовані пластики.

До I групи можна віднести Wood і BambooFill пластики що імітують деревину.

3D пластик BambooFill. Це високоякісний пластик, що імітує деревину. Пластик складається з дрібнодисперсного деревного порошку і полімерного з'єднувача, подібного за властивостями до пластика PLA. При певному режимі 3D-друку, дозволяє імітувати фактуру натурального дерева: річні кільця, кору та інше. Добре піддається поліруванню і іншим видам механічної обробки.

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виготовлення: виробів, що імітують дерево; декоративних та декоративно-прикладних виробів.

3D пластик Wood. Даний пластик один із унікальних матеріалів для друку на 3D-принтері. В його склад входить деревний пил і полімерна з'єднувальна речовина. Кількість деревного пилу в цьому матеріалі досягає 70%, що забезпечує йому приємну фактуру і характерний колір. В основному використовується деревний пил тополі. За характеристиками цей витратний матеріал нагадує пластик PLA і плавиться в тому ж температурному діапазоні (170–230 °C).

Основні властивості: вологостійкість, нетоксичність. При необхідності готові вироби добре шліфуються і покриваються лаком, що надовго зберігає їх властивості. Чим вище робоча температура при друку, тим темнішою буде модель. Застосовується для виготовлення: декоративних об'єктів; макетів; фурнітури для ремонту дерев'яних виробів, меблів і т.п.

До II групи можна віднести металізовані пластики такі як: BronzeFill, PLA Aluminium, PLA Brass, PLA Copper. Кожен із видів має свої особливості за рахунок додавання до складу різних часток металевого пилу.

3D пластик BronzeFill. Даний пластик імітує бронзу. В його склад входить дрібнодисперсний бронзовий порошок і полімерний з'єднувач, подібний до пластику PLA. Завдяки добрій електропровідності, дозволяє включати вироби в електричні ланцюги. Після полірування набуває блиск металу. Добре піддається механічній і хімічній обробці.

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виготовлення декоративних та декоративно-прикладних виробів [4].

Алюмінієвий 3D пластик (PLA Aluminium). Металізований пластик для друку на звичайному 3D-принтері. Даний пластик імітує алюміній. В його склад входить звичайний PLA пластик в якості з'єднувача і близько 30% алюмінієвої пудри. В якості різних функціональних деталей його краще не застосовувати, через PLA пластик в його складі.

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виготовлення декоративних та декоративно-прикладних виробів.

Латунний 3D пластик PLA Brass. Даний пластик імітує латунь. В його склад входить звичайний PLA пластик і близько 30% латунної пудри. Завдяки додаванню металевому порошку філамент має більшу міцність чим звичайний PLA пластик, але все таки його краще не використовувати для створення різних технічних компонентів.

Основні властивості: низька усадка при охолодженні; висока міцність; низька еластичність; можливість друку на холодній платформі. За властивостями і параметрам майже не відрізняється від PLA, але зовнішній вигляд деталей нагадує справжні металеві вироби, особливо після шліфування і полірування. Застосовується для виготовлення декоративних виробів.

3D Пластик PLA Copper. Як і більшість металізованих полімерів складається з пластика PLA як з'єднувальної речовини, і металевому порошку міді. Даний пластик імітує мідь. В якості різних функціональних деталей його краще не застосовувати, через наявність пластику PLA в його складі. Легко обробляється механічними методами. В результаті обробки виробів з такого матеріалу можна домогтися практично глянцевої поверхні з металевим відливом. Оброблені моделі мало відрізняються від справжніх мідних виробів [5].

Основні властивості подібні до пластика PLA. Застосовується для виробництва декоративних виробів, іграшок і сувенірів.

4 Допоміжні матеріали. Це група пластиків, що застосовуються для побудови допоміжних технологічних елементів, необхідних для 3D-друку виробів, що мають складну просторову конфігурацію. Такі елементи після закінчення друку видаляються. Так як 3D-друк здійснюється пошарово, виникають ситуації, коли при побудові чергового шару з'являються частини, що виступають за габарити попереднього. Щоб такі частини не «висіли в повітрі», під ними спочатку друкуються спеціальні підтримки і підкладки. З цією метою використовують два найбільш ефективних і універсальних типи допоміжних пластиків PVA і HIPS.

3D пластик PVA (полівінілацетат (PVA)). Це водорозчинний напівпрозорий матеріал на основі вінілацетату. У побуті відомий, як клей ПВА.

Основні властивості: нетоксичний, водорозчинний. Застосовується для виготовлення підтримок і підкладок при друку складних об'єктів; прототипів оскільки добре зберігає при друку задані розміри.

Пластик HIPS (полістирол). Це термопластичний полімер, на основі стиролу. Розчиняється органічним розчинником лімоненом. Він не володіє якимисьь видатними механічними властивостями, але він абсолютно незамінний при друку двома і більше екструдера, як матеріал для створення розчинних підтримок і спайок. Саме завдяки йому існує можливість створювати скільки завгодно складні об'єкти, особливо такі, де один предмет знаходиться всередині іншого [5].

Основні властивості: низька усадка, крихкість; не розчиняється у воді; якісна передача заданих розмірів; нетоксичність і безпечність; не коробиться і не повзе. Застосовується для виготовлення: підтримок і спайок при друку складних об'єктів; прототипів оскільки добре зберігає при друку задані розміри; виробів, що контактують із їжею.

Це далеко не повний перелік актуальних сучасних 3D матеріалів, а лише їх мала частина. Існують і інші матеріали для 3D-друку, що не увійшли до огляду у даній статті, це зокрема: COLORFUL, GLOW, ABS Antistatic, CERAMIC, GLASSFIL тощо. Їх властивості, технічні характеристики та сфери застосування будуть розглянуті в наступних роботах.

Результат роботи

На основі проведеного огляду 3D філаментів складемо їх узагальнену класифікацію (рис. 1) за групами залежно від механічних та хімічних властивостей, призначення та областей застосування і зведемо таблицю з їх основними технічними характеристиками (табл. 1).

Наявність зведених основних технічних характеристик дозволить більш швидко проводити при необхідності вибір 3D матеріалів для 3D-друку залежно від призначення та умов експлуатації та здійснювати їх одночасний порівняльний аналіз.

Виходячи із приведених даних в даній таблиці, можемо зробити висновок, що всі матеріали для 3D-друку відрізняються один від одного, матеріал нитки може мати найрізноманітніші властивості. Філамент може бути хрумким або міцним, гнучким або твердим, гладким або шорстким, важким або легким і т.п.

Пластикова нитка може бути двох стандартних діаметрів: 1,75 і 3 мм. Природно, вони не взаємозамінні, і вибір потрібного діаметра слід уточнювати за специфікацією принтера. Пластикова нитка може бути різних виробників. Це можуть бути відомі світові бренди, але і виробники незрозумілого походження та не визначеної якості. Для кожного типу матеріалу повинні бути відомі робоча температура, до якої повинен нагріватися матеріал в друкуючій головці, і температура підігріву робочого столу (платформи) для кращого прилипання першого шару. Ці величини не завжди однакові для будь-якого зразка нитки, зробленої з матеріалу одного типу. Тому в таблиці вказаний приблизний діапазон. Оптимальні температури повинні вказуватися на етикетці котушки або в супровідному документі, але це відбувається далеко не завжди, і часто їх доводиться підбирати експериментально.



Рис. 1. Узагальнена класифікація 3D матеріалів

Таблиця 1

Основні технічні характеристики 3D філаментів

№ №№/п	Матеріал	Технічні характеристики філаментів											Виробник
		Густина, г/см ³	Гранічна міцність, МПа	Модуль пружності, МПа	ВВідн. видовж. на розрив і розтяг, %	ЛЛит тва усадка, %	Поверхневий опір, Ом	Температура екструдера при друку, °С	ТТемпература стола при друку, °С	ШШВидкість друку, мм/с	Діаметр нитки пластику, мм		
11	ABS	1,04	38	2700		0,4		210-270	1100	440-70	1,75; 3	Esun, Китай	
22	ABS+	1,06	38	2800	4	0,1		215-230	895	440-80	1,75;3	MonoFilament, Україна	
33	PLA	1,2	40	2265	5			210-255	1100-120	440-70	1,75; 3	3DDDevice, Китай	
44	PET флуоресцентний	1,04	36	2265	4			210-245	1100-120	440-70	1,75	3DDDevice, Китай	
55	ABS Conductive	1,15	45	2000	10		10 ³ -10 ⁵	210-270	1100	440-70	1,75	3DDDevice, Китай	
66	Carbon Fiber	1,11	44	4018	18		більше 10 ¹⁰	220-240	1100-110	540-70	1,75	ColorFab, Голандія	
77	Carbon Fiber XT-CF20	1,3	76			0,2	10 ⁹	240-260		440-70		ColorFabb, Голандія	
88	Carbon Esun EPA-CF	1,14	63,9	4387	4		10 ¹⁰	240-260	660	40-60	1,75	Esun, Китай	
99	PLA+	1,24	60		29	-		205-250	680	440-60	1,75; 3	Esun, Китай	
110	BronzeFill	3,9						195-220	50-60		1,75;2,85	ColorFabb, Голандія	
111	PETG Clear	1,38	55-57	280-3100				210-220	50	40-60	1,75;3	3DDDevice, Китай	
112	PLA Aluminium	1,29						190-230	060	340-150	1,75;3	3DDDevice, Китай	
113	PEEK	1,4	200	3600	25	0,1	3x10 ⁶	380			1,75	3DDDevice, Китай	
114	CoPET	1,27	70	2100	5	0,2		230-240	470	440-60	1,75	MonoFilament, Україна	
15	POM	1,41	65,5	2758	0		10 ³ -10 ⁵	250-270			1,75	3DDDevice, Китай	
116	Primalloy	1,09	85		990			210-235	450		1,75	Verbatim, Японія	
117	TPU	1,25	79,97					200-220	8100	340-50	1,75	3DDDevice, Китай	
118	HIPS	1,05		2400				230-240	9100	340-60	1,75;3	MonoFilament, Україна	
119	PLC	1,16	29		11			70-100			1,75	Esun, Китай	
220	FCoPet	1,27	570	2100				2230-240	440-70	440-60	11,75	MonoFilament, Україна	
221	Flex	1,2	35		5			220-250	1100-110		1,75	3DDDevice, Китай	
222	PET	1,38	55-75	3000				210-230	890	440-60	1,75	3DDDevice, Китай	
223	BronzeFill	1,2						190-210	990	440-60	1,75	Esun, Китай	

В ідеалі об'єкт повинен розроблятися під конкретний матеріал. Наприклад, якщо відомо, що 3D-

модель буде надрукована із пластику PLA, то необхідно дотримуватися конкретних рекомендацій при проектуванні виробу із цього матеріалу (це, наприклад підтримка нависаючих частин, укріплення виступаючих елементів, згладжування кутів і т.п.). Вибір матеріалів для друку зумовлює деякі з основних принципів проектування, які необхідно враховувати. Притримуватися правил проектування для конкретного матеріалу має велике значення для успішного друку. З цією метою необхідно користуватися довідковою літературою, зокрема даними, приведеними в табл.1.

З метою полегшення вибору полімерів на етапі проектування виробу, на основі технічних характеристик та областей застосування розглянутих 3D філаментів, було складено таблицю з рекомендаціями по їх використанню для виготовлення деталей та виробів в різних галузях промисловості (табл. 2).

Таблиця 2

Рекомендації по використанню 3D філаментів для виготовлення деталей та виробів

№/п	Назва деталі виробу	Використаний матеріал
1	Швейні вироби: деталі одягу швейна фурнітура	Elastan, PLC, Nylon
		ABS, HIPS, PC, PLC
2	Взуттєві вироби	PLA, PLA+, Filaflex, PLC, TPU
3	Галузеве машинобудування: корпуси деталей зубчаті колеса і деталі механічних передач різьбові з'єднання електричні пристрої, плати підшипники, деталі ковзання, шестерні	ABS, CoPet, ABS ⁺
		PET, PC, PBT, Nylon, Platan, ABS
		PC, PBT
		ABS Conductive
		POM, Nylon, PET флуоресцент.
4	Деталі автомобілів, літаків	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PC
5	Деталі холодильних камер	PLA, PET, PEEK
6	Механічні вузли, корпуси виробів	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PET, CoPet
7	Електроніка, електромонтажна фурнітура	PET, PEEK, POM, HIPS, ABS Conductive, Nylon
8	Термостійкі матеріали	PC, ABS Conductive PET флуоресцентний, PET, Nylon, PEEK
9	Струмopрoвідні матеріали	ABS Conductive, BronzeFill, BambooFill
10	Вогнетривкі матеріали	вогнетривкий ABS, PEEK
11	Деталі для імітації дерев'яних поверхонь	BambooFill
12	Деталі для імітації металевих поверхонь	BronzeFill, PLA Aluminium, PLA Brass, PLA Copper
13	Вироби побутового призначення	PETG Clear, PLC, PP, T-Glace
14	Акcesуари	Color Changing
15	Зносостійкі матеріали	TPU, PET, Primalloy, PEEK

Висновки

В даній статті розглянуто основні види 3D філаментів, які використовуються для 3D-друку за технологією FDM. Проведено аналіз їх основних властивостей, технічних характеристик та сфер застосування. На основі здійсненого аналізу складено узагальнену класифікацію філаментів для 3D-друку за основними групами їх призначення, зведено характеристики, що їх характеризують в єдину таблицю та надано рекомендації з вибору певних видів 3D пластиків для виготовлення виробів або деталей в різних галузях промисловості.

References

1. Additivnye tekhnologii i 3D-pechat. URL: www.forbes.ru/tehnologii/342687-additivnye-tehnologii-i-3d-pechat-v-poiskah-sfer-primeneniya.
2. MonoFilament. URL: <file:///C:/Users/monofilament.html>.
3. 3D Device. URL: file:///https://3ddevice.com.ua/shop/3d-plastic/?gclid=Cj0KCQjw4eXPBRCTARIsADvOjY3_AYefJoNJ3pH5JFBmTwIATP1oTLogNa7QAEyW6jIT4CYyWjwZQkgAssoEAL.html
4. Printer dlya pechati obuvi. URL: <http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/869.html>
5. 3D Device. URL: <file:///https://3ddevice.com.ua/shop/metallizirovannye-plastiki>

Рецензія/Peer review : 27.11.2017 р.

Надрукована/Printed : 03.12.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кармаліта А.К.