

**В. М. ОРЕЛ**

кандидат технічних наук,  
докторант кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0000-0002-8775-3253

**О. Ф. САЛЕНКО**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-5685-6225

**Т. Ф. КОЗЛОВСЬКА**

кандидат хімічних наук, доцент,  
завідувач кафедри авіаційного транспорту  
Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ  
ORCID: 0000-0002-6106-5524

**П. П. МЕЛЬНИЧУК**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0000-0003-0361-756X

**О. О. САМОХЛІБ**

викладач кафедри авіаційного транспорту  
Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ  
ORCID: 0009-0005-5240-1759

## ВПЛИВ КАРБОНОВОГО АРМУВАЛЬНИКА НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІЛАКТИДНОГО ФІЛАМЕНТУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ В ІНЖЕНЕРНИХ ВИРОБАХ

У статті досліджено вплив карбонового армувальника на фізико-механічні та експлуатаційні властивості полілактидного філаменту, що використовується для виготовлення інженерних виробів методами адитивного виробництва, технологією пошарового наплавлення (FDM). Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення міцності, зносостійкості та стабільності властивостей полімерних матеріалів при їх використанні в умовах змінних температур і навантажень, а також можливістю застосування 3D-друкованих виробів в інженерних виробках.

У роботі розглянуто фізико-хімічні механізми взаємодії між полілактидом та карбоновим армувальником, зокрема процеси адгезії, когезії та дифузії на межі поділу «полімер-карбон». Проаналізовано роль електрон-електронної взаємодії, міжмолекулярних зв'язків і впливу технологічних факторів (температура, час контакту, тиск) на формування структури композитного матеріалу. Встановлено, що адгезійна міцність визначається як механічними, так і фізико-хімічними процесами, включаючи мікроадсорбцію та дифузійне проникнення частинок карбону в поверхневі шари полімеру.

Експериментальна частина дослідження передбачала виготовлення зразків із додаванням близько частки карбонового наповнювача та їх випробування на розтяг відповідно до стандарту ASTM D638-14. У результаті встановлено, що введення карбонового армування призводить до підвищення межі міцності на розрив і зносостійкості на діаграмах напруження-деформації.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування карбон-модифікованого полілактиду для виготовлення функціональних інженерних виробів із заданими механічними та ізоляційними властивостями та створюють основу для подальших досліджень у напрямі оптимізації складу і технологічних режимів 3D-друку.

**Ключові слова:** карбонове армування, композиційні матеріали, адитивні технології, механічні властивості, крихке руйнування.



V. M. OREL

PhD of Technical Sciences,  
Doctoral Student at the Department of Mechanical Engineering  
and Automobile Transport  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0000-0002-8775-3253

O. F. SALENKO

Sc. D., Professor,  
Head of the Department of Machine Design  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-5685-6225

T. F. KOZLOVSKA

Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,  
Head of the Department of Aviation Transport  
Kremenchuk Flight College  
of Kharkiv National University of Internal Affairs  
ORCID: 0000-0002-6106-5524

P. P. MELNICHUK

Sc. D., Professor,  
Professor at the Department of Mechanical Engineering  
and Automobile Transport  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0000-0003-0361-756X

O. O. SAMOKHLIB

Lecturer at the Department of Aviation Transport  
Kremenchuk Flight College  
of Kharkiv National University of Internal Affairs  
ORCID: 0009-0005-5240-1759

## INFLUENCE OF CARBON REINFORCEMENT ON THE PROPERTIES OF POLYLACTIDE FILAMENT USED IN ENGINEERING PRODUCTS

*This article investigates the effect of a carbon reinforcement on the physical, mechanical, and performance properties of a polylactide filament used to manufacture engineering products via additive manufacturing methods, specifically fused deposition modeling (FDM). The relevance of the study stems from the need to improve the strength, wear resistance, and stability of polymer materials when used under conditions of varying temperatures and loads, as well as the potential for applying 3D-printed products in engineering applications.*

*This work examines the physicochemical mechanisms of interaction between polylactide and carbon reinforcing fibers, specifically the processes of adhesion, cohesion, and diffusion at the polymer-carbon interface. The role of electron-electron interactions, intermolecular bonds, and the influence of technological factors (temperature, contact time, pressure) on the formation of the composite material's structure is analyzed. It was established that adhesive strength is determined by both mechanical and physicochemical processes, including microadsorption and the diffusion penetration of carbon particles into the surface layers of the polymer.*

*The experimental part of the study involved the fabrication of specimens with the addition of approximately 10% carbon filler and their tensile testing in accordance with ASTM D638-14. As a result, it was established that the introduction of carbon reinforcement leads to an increase in the tensile strength and wear resistance of the material; however, it changes the fracture behavior to brittle, which is confirmed by the absence of plastic deformation in the stress-strain diagrams.*

*The results obtained confirm the potential of using carbon-modified polylactide for the manufacture of functional engineering products with specified mechanical and insulating properties and provide a basis for further research aimed at optimizing the composition and processing parameters of 3D printing.*

**Key words:** carbon reinforcement, composite materials, additive technologies, mechanical properties, brittle fracture.

### Постановка проблеми

Сучасні інженерні засоби все більше вимагають використання виробів, отримуваних адитивними процесами, зокрема, 3D друком, що розширює технічні можливості обладнання, зменшує час на його виробництво або відновлення (останнє особливо актуально в умовах швидкого ремонту енергетичного устаткування).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зазвичай для вирішення технічних питань використовуються пластики, яким притаманні відомі фізико-технічні характеристики, наведені в [1]. Як правило, такі пластики забезпечують задовільні властивості в діапазоні температур 5-35 °С, мають практично нульову електропровідність (високі діелектричні властивості), низьку діелектричну проникненість тощо. Однак головним недоліком залишається проблема забезпечення високої міцності виробів в умовах підвищених температур (у діапазоні 50-200 °С), яка традиційно вирішується кількома способами [2]:

- оптимізацією положення відтворюваного виробу на столі принтера;
- раціональною топологією;
- армуванням пластику спеціальними домішками та армувальниками.

Додатково є вимога забезпечення низки властивостей щодо екологічності, рециклінгу та ін. [3].

В якості армувальних елементів в інженерних матеріалах для друку як правило використовується рублене органічне, скло- або вуглецеве волокна. За результатами, викладеними в [4], стає зрозумілим, що міцність готового виробу, яка зазвичай складає 60...70 % в філаменту, може бути збільшена до 85...90 %. У той же час донині не зрозуміло, як саме впливають на показники міцності хімічні процеси і явища, що перебігають у системі «армувальник-основа», і які можливості відкриваються для використання друкованих виробів як елементів і деталей.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є теоретико-експериментальне дослідження впливу карбонового наповнювача на структуру та властивості полілактидного філаменту, а також обґрунтування можливості формування матеріалів із заданими механічними характеристиками.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Слід зазначити, що будь-які технологічні процеси потребують урахування не тільки їх особливостей, але й, так би мовити, наслідків створення нових технологій - зокрема екологічних, або біосумісності.

З точки зору біосумісності, а також вимог щодо повторного використання сировини, отриманої з утилізованих виробів, найбільш привабливим полімером є полімолочна кислота – полілактид PLA і поліамід –  $\omega$ -лауролактан PA 12 (рис. 1, а, б).

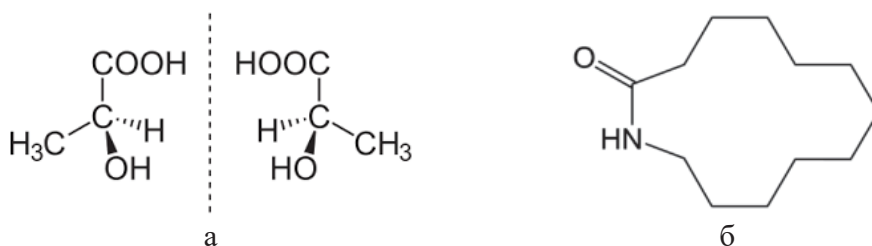


Рис. 1. Хімічні структури мономерів PLA і PA 12:  
а – молочна кислота; б –  $\omega$ -лауролактан [1]

Властивості полілактиду залежать від стереохімічного складу мономера (рис. 1, а) і можуть наблизитися до властивостей полістиролу та полівінілхлориду [2, 3]. Окремо слід зазначити, що полілактид є рацемізованою сумішшю L і D-стереоізомерів класу органічних гідроксикарбонових кислот, і в літературі немає даних стосовно переважного використання або L-, або D-ізомерів при формуванні карбонполілактидного модифікованого матеріалу задля отримання адгезійного шару з оптимальними властивостями (рис. 2).

$\omega$ -Лауролактан PA 12 – це нейлоновий полімер із загальною формулою  $[-(CH_2)_{11}C(=O)NH-]_n$ .

Він виготовляється з мономерів  $\omega$ -амінолауринової кислоти, або  $\omega$ -лауролактану (рис. 1, б), кожен з яких містить 12 атомів вуглецю, звідси й назва «нейлон 12». Переважне застосування поліаміду PA 12 ґрунтується на його механічних властивостях – високій міцності з гарним рівнем гнучкості, що пояснюється пласкою формою молекули, яка забезпечує співвідношення полярностей взаємодіючих речовин. PA 12 є стійким до стирання, міцний до розтягування з високим рівнем твердості.

Йому притаманна хімічна стійкість, знижена чутливість до розтріскування під навантаженням. З технічної і технологічної точки зору коефіцієнт тертя ковзання низький, є зносостійким, володіє гарною ударною в'язкістю і удароміцністю. PA 12 має гарні електроізоляційні властивості, не реагує на присутність вологи за рахунок достатньо великої довжини карбонового ланцюга, та тримає щільність 1,01 г/см<sup>3</sup> [4].

Вище викладене дає змогу оцінити фізико-хімічну механіку адгезійної міцності полімерів, що досліджуються, задля виготовлення відповідного карбон-модифікованого матеріалу з подальшим застосуванням у 3D друці.

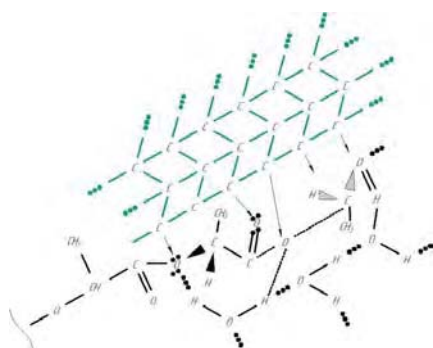


Рис. 2. Фрагмент електрон-електронної взаємодії PLA з порошкоподібним Карбоном [авторський доробок]

Адгезійну міцність і PLA, і PA 12 можна оцінювати за величиною роботи, яку необхідно витратити на руйнування адгезійних зв'язків. Основний полімер і утворення шару Карбону на відповідній поверхні слід розглядати у спрощеному випадку як зчеплення між шарами однорідних матеріалів. І це можна назвати аутогезією, або самозлипанням. Можливість створення карбон-модифікованих матеріалів може бути пояснено із застосуванням теорії електрон-електронної взаємодії атомів основної підложки (полімер) і атомів Карбону, що відображається на процесі адгезії.

Окрім того, адгезійна міцність не є величиною сталою. У процесі утворення під час експлуатації адгезійна міцність може бути спочатку стабільною, навіть зростати. З часом за рахунок впливу високої температури у карбоновому покритті створюються умови для збагачення функціональними групами PLA і PA 12, що відображається на процесах фізико-хімічної взаємодії, в основному за рахунок електрон-електронного перекриття атомів полімеру і атомів Карбону (рис. 3).

Слід зазначити, що для PLA і PA 12 характерними є обидва відомі типи адгезії – молекулярна і дифузійна, але переважає звичайна механічна адгезія у вигляді мікроадсорбції на поверхні полімеру, а зважаючи на розвинений характер хімічної будови молекул PA 12 його хімічної структури.

Оскільки полімерні матеріали, що розглядаються як хімічні складові, містять активні функціональні групи (–NH–, –C=O, –COO–, –C–O–), то за відповідних умов (температура, час адгезійного контакту, тиск при формуванні карбон-полімерного матеріалу) може спостерігатись і когезія – взаємодія окремих атомів між собою всередині полімерного матеріалу. Енергія когезії складає у такому випадку приблизно 25-65 кДж/моль [4-9]. Окрім того, утворення карбонового шару на поверхні полімеру і всередині нього є результатом прояву адсорбційних сил. З іншого боку одночасно відбувається і дифузія макроатомарного карбонового покриття у поверхневі шари відповідного полімеру.

Отже, чинниками, що сприяють адгезії, виступають температура, час адгезійного контакту, тиск. Введення пластифікаторів, обробка розчинником полегшує дифузійний обмін у поверхневому (контактному) шарі і сприяє поліпшенню процесу адгезії.

Особливу увагу привертають процеси мікрореологічного затікання в мікропори відповідного полімеру і тріщини готового виробу при так званому «шліфуванні» в парах відповідного розчинника [10]

Звідси за рівнянням Ейнштейна–Смолуховського можна визначити глибину проникнення атомів Карбону в товщу відповідного полімеру [10], що буде еквівалентним товщині дифузійного шару у карбон-полімерному покритті:

$$\delta = \sqrt{2D \cdot \tau}, \tag{1}$$

де D – коефіцієнт дифузії, см<sup>2</sup>/с; τ – час переміщення атому вглиб поверхневого шару полімеру, с.

Коефіцієнт дифузії полімерів у високоеластичному стані складає 10<sup>-10</sup>–10<sup>-16</sup> см<sup>2</sup>/с. Зі збільшенням молекулярної маси полімеру на один порядок коефіцієнт дифузії знижується приблизно на два порядки. Тому взаємопроникнення простягається на невелику глибину, і перехідна зона не перевищує 10<sup>-8</sup> м [11].

Не останню роль відіграє наявність молекул води, що залишаються у полімері після реакції поліконденсації молочної кислоти. З одного боку, вони утворюють порожнини всередині PLA, що сприяє формуванню внутрішніх тріщин зі зниженням міцнісних характеристик, особливо після модифікації порошкоподібним карбоном. З іншого боку, той самий PLA утворює міжмолекулярні водневі зв'язки, що дозволяє зберігати адгезійну міцність протягом тривалого часу, навіть якщо взаємодія зумовлена ван-дер-ваальсовими силами (рис. 2).

Зважаючи на викладене вище, утворення карбон-полімерного матеріалу можна розглядати як процес плівкоутворення із полімеру на поверхні Карбону, що слугує основою формування карбон-полімерного матеріалу.

Звідси PLA повинен мати стійку адгезійну міцність з карбоном як фікатором хімічних і механічних властивостей і полімеру як такого, і його модифікованого матеріалу, чого не можна стверджувати про PA 12 (рис. 3).

На процес зшивання карбону з полімером впливає і зовнішня вологість – чим вона вища, тим більша швидкість відшаровування від основи і тим менше часу необхідно на руйнування адгезійних зв'язків. Але хімічна будова PA 12 і PLA є полярним покриттям, тобто з порошкоподібним карбоном утворюються гідролітично стійкі хімічні зв'язки донорно-акцепторного характеру з енергетично більшою взаємодією, що зумовлює стійкість кінцевого виробу до вологого середовища та до відшаровування. Адсорбція вологи з повітря та межі поділу порошкоподібний карбон-полімер сприяє збереженню адгезійної міцності, і тут можна вираховувати час відшаровування за відомим рівнянням [11]:

$$\tau = A_0 \cdot e^{-K\sigma}, \tag{2}$$

де A<sub>0</sub> – початкова адгезія; K – стала процесу.

Слід зазначити, що в початковому стані внутрішні напруження наближаються до нуля, але зі збільшенням температури максимум адгезії, скоріш за все, буде знаходитись в інтервалі між температурами склоутворення і високоеластичним станом, що і буде оптимальним для здійснення 3D друку.

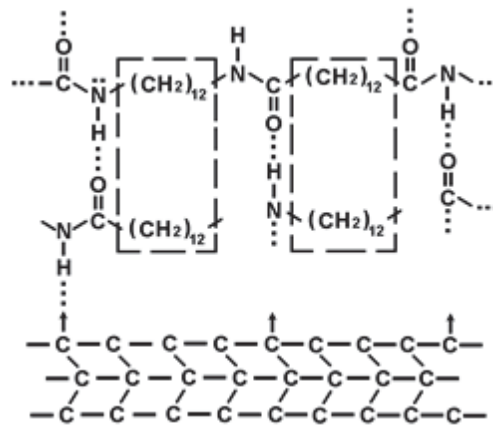


Рис. 3. Фрагмент електрон-електронної взаємодії PA 12 із порошкоподібним Карбоном [авторський доробок]

Необхідно звернути увагу на те, що руйнування адгезійних зв'язків не залежить від умов експлуатації і підкоряється рівнянню Журкова [12],

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{E_a - \gamma\sigma}{kT}}, \quad (3)$$

де  $\tau$  – час до початку руйнування;  $\tau_0$  – усереднений час між коливаннями атомів, що утворюють хімічний зв'язок і беруть участь в адгезійному процесі (приймається  $10^{-12}$  с);  $E_a$  – енергія активації руйнування хімічних, адгезійних зв'язків;  $\gamma$  – структурно-чутливий коефіцієнт, що враховує міцність початкових хімічних зв'язків;  $\sigma$  – прикладена напруга у процесі модифікації під час 3D друку;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура процесу, К.

Отже, додаткових досліджень для PLA і PF 12 потребує встановлення часу відшаровування від основи модифікованих полімерів PLA і PA 12.

Однак PA 12 за своєю хімічною структурою є більш схильним до гнучкості, пластичності внаслідок наявності ланцюга з 12 атомів Карбону в самому мономері. Це сприяє більш рівномірному розподілу карбонового скелету при модифікації його Карбоном, а, відповідно, більш рухливі адгезійні і хімічні зв'язки, що сприяє витривалості при зміні температур процесу і навколишнього середовища при охолодженні готового виробу.

Слід зазначити, що при поєднанні двох різних матеріалів виникають напруження, зумовлені відмінностями фізичних властивостей і наявністю адгезійного контакту, що пов'язано з виникненням внутрішніх напружень:

- усадочні (виникають внаслідок усадки порошкоподібного карбону під час формування та експлуатації виробу);
- термічні – з'являються при зміні температури внаслідок невідповідності значень температурних коефіцієнтів лінійного розширення полімеру і порошкоподібного карбону.

Досить часто за підвищених температур внутрішні напруження є сумою усадочних і термічних напружень, що формує напруження розтягу і небезпеку когезійної та адгезійної міцності, а, відповідно, довговічність покриття.

Наслідком дії таких напружень може відбуватись відшаровування вже в процесі формування карбонполімерного покриття.

Для механічних випробувань зразків матеріалу в якості армуючих елементів використовували подрібнені волокна, зображені на рис. 4, а, б, термічно розширений графіт та відходи з ровінгів марки Markforged Забезпечивши 5 % вагову частку наповненого полілактиду перед формуванням нитки, досліджувані зразки були надруковані на 3D-принтері для випробування на розтяг.

У ході дослідження розглядалися зразки, виготовлені з NYLON з вуглицем на напівпрофесійному 3D-принтері Flyingbear Tornado 2 pro. Режими 3D друку наведені в табл. 1.

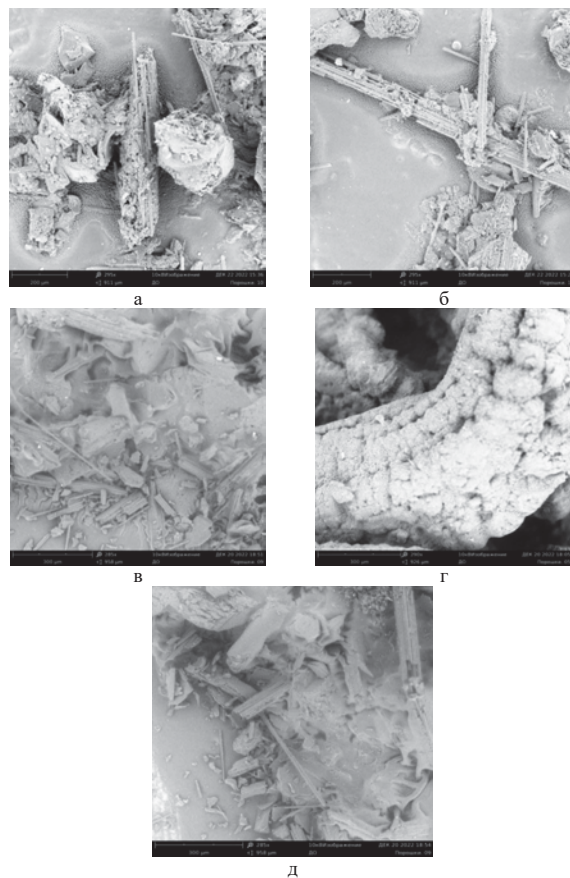


Рис. 4. Мікрофотографії армуючого матеріалу: (а) і (б) подрібнені вуглецеві волокна, (в) і (г) подрібнені вуглецеві волокна, (д) термічно розширений графіт [авторський доробок]

Таблиця 1

Режими друку тестових зразків [авторський доробок]

	Extruder temp °C	Movement speed, mm/s	Tem table, °C	Layer thickness, mm	Diameter nozzle,
NYLON with carbon	230	30...80	60	0,25	0,4

Зразки [13-16] в цьому дослідженні мали стандартну форму для випробування за стандартом ASTM D638-14 «Стандартний метод випробування на розтягнення пластмас» (рис. 5).

Випробування на розтягнення проводилися за допомогою електромеханічної випробувальної машини TIRA test 2300 (рис. 6), оснащеної механічними клиновими затискачами.

Швидкість навантаження зразків була обрана відповідно до вимог ASTM D638-14, щоб забезпечити тривалість випробування не менше однієї хвилини і швидкість 2 мм/с.



Рис. 5. Типові зразки для механічних випробувань



Рис. 6. Випробування TIRA 2300 електромеханічна випробувальна машина використовувалася з фіксованою конфігурацією зразків для експериментів

У результаті випробувань зразків було встановлено, що композитний матеріал руйнується за крихким механізмом. Це підтверджується зовнішнім виглядом діаграми розтягування, на якій відсутня плато пластичності (рис. 7, а), а також візуальним виглядом руйнувань (рис. 7, б). Тому характеристикою міцності матеріалу було визначено значення межі міцності на розрив ( $\sigma_v$ ), що відповідає напруженню при максимальному навантаженні до руйнування зразка. Результати випробувань зразків з матеріалу Nylon+Carbon наведені в табл. 2.

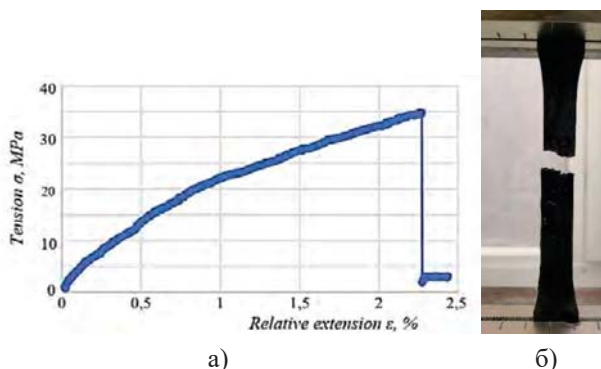


Рис. 7. Типовий вигляд діаграми розтягування випробувальних зразків (а), руйнування композитних зразків (б)

Таблиця 2

## Результати випробувань на розтягування зразків «нейлон + вуглець»

№	Ширина, мм	Товщина, мм	Вага, г	Сила розтягу, Н	Напруження на розрив, МПа
1	13,8	3,4	7,63	1426	30,39
2	13,5	3,1	7,81	1307	31,25
3	14,0	3,4	7,58	1394	29,31
4	13,5	3,2	7,85	1536	35,56
5	13,4	3,1	7,76	1615	38,89
6	13,4	3,2	7,85	1343	31,34

Проведені експерименти з випробування на розтягнення показали, що додавання вуглецевого армування значно покращує механічні властивості полілактидної нитки. Міцність на розтягнення та зносостійкість нитки значно підвищилися після додавання вуглецевого армування. Композитний матеріал продемонстрував механізм крихкого руйнування, про що свідчить відсутність плато пластичності на кривій напруження-деформація та поява поверхні руйнування.

Отримані експериментальні значення межі міцності на розрив композитного матеріалу на основі полілактиду з карбоновим армуванням (29,31-38,89 МПа) узгоджуються з результатами інших досліджень у галузі адитивного виробництва полімерних композитів. Так, у роботах [6, 8] показано, що введення волокнистих або дисперсних наповнювачів у полімерну матрицю, отриману методом FDM, забезпечує підвищення міцності в межах 15-40 % залежно від концентрації наповнювача та орієнтації шарів.

Зокрема, за даними [8], композити на основі термопластів із волокнистим армуванням демонструють межу міцності на розрив у діапазоні 30-45 МПа, що корелює з отриманими у даній роботі значеннями. У дослідженні [9] встановлено, що збільшення вмісту армувального компонента призводить до зростання жорсткості матеріалу та одночасного переходу до крихкого механізму руйнування, що також підтверджується результатами даної роботи.

**Висновки**

Встановлено, що введення карбонового армувальника ( $\approx 5$  мас. %) у полілактидний філамент призводить до підвищення межі міцності на розрив до 29,31-38,89 МПа, що підтверджено експериментальними випробуваннями за стандартом ASTM D638-14. Отримані значення демонструють стабільне зростання міцності порівняно з неармованими полімерними матеріалами аналогічного класу.

Виявлено зміну механізму руйнування матеріалу: композит характеризується крихким типом руйнування, що підтверджується відсутністю ділянки пластичної деформації на діаграмах «напруження-деформація» та характером поверхні зламу. Це свідчить про зростання жорсткості матеріалу при зниженні його пластичності.

Показано, що введення карбонового наповнювача не призводить до формування електропровідної структури: матеріал зберігає діелектричні властивості, що підтверджує можливість його використання в електротехнічних виробках як ізоляційного конструкційного матеріалу.

Обґрунтовано, що формування фізико-механічних властивостей карбон-полімерного композиту визначається поєднанням адгезійних, когезійних та дифузійних процесів, а також впливом технологічних параметрів FDM-друку (температура екструзії, товщина шару, швидкість друку).

**Список використаної літератури**

- Iftekar, S. F., Aabid, A., Amir, A., & Baig, M. (2023). Advancements and limitations in 3D printing materials and technologies: a critical review. *Polymers*, 15(11), 2519.
- Qin, S., Dai, J., Tian, H., Zhang, H., Huang, J., Guan, T., ... Wan, J. (2025). 3D printing driving innovations in extreme low-temperature energy storage. *Virtual and Physical Prototyping*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2459798>.
- Malik A, UINhaq MI, Raina A, Gupta K (2022), "3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges". *Industrial Robot*, Vol. 49 No. 3 pp. 491–511, doi: <https://doi.org/10.1108/IR-10-2021-0247>.
- Badogu, K., Kumar, R. & Kumar, R. 3D Printing of Glass Fiber-Reinforced Polymeric Composites: A Review. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 103, 1285–1301 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00873-1>.
- Manchenko, O., Nizhnik, V., Kuryliuk, O., Iukhymenko, N., Budzinska, V. (2024). Some Features of the Chemical Plasticization of Polymers Without Side Groups. In: Fesenko, O., Yatsenko, L. (eds) *Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications*. NANO 2023. Springer Proceedings in Physics, vol 253. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67519-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67519-5_6).
- Verbeeten W. M. H. and Lorenzo-Bañuelos, M. Material Extrusion Additive Manufacturing of Poly (Lactic Acid): Influence of infill orientation angle. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 59. P. 10307911-16. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103079
- Turner B., Strong R. and Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes : I. Process design and modeling. *Rapid Prototyp J*. 2014. Vol. 20, no. 3. P. 192–204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012
- Zhuang Y., Zou B., Ding S. and Wang P. Shear and Tensile Behaviors of Fiber-Reinforced Resin Matrix. *Composites Printed by the FDM Technology. Coatings*. 2022. Vol. 12. P. 1000-1-13. DOI: 10.3390/coatings12071000

9. Rijckaert S. et al. Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication. *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 298-1-16. DOI: 10.3390/polym14020298
10. Орел В. М., Козловська Т. Ф., Саленко О. Ф., Мельничук П. П. Постооброблення виробів інженерного призначення, отриманих методами адитивного пошарового моделінгу. *Технічна інженерія*. 2025. № 1 (95). С. 76-93. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93)
11. Костржицький А. І. Калінов О. Ю., Тіщенко В. М., Берегова О. М. Фізична та колоїдна хімія. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 496 с.
12. Підгорна Л. П., Черкашина Г. М., Лебедев В. В. Теорія та методи дослідження і випробування пластмас, клеїв та герметиків : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. 276 с.
13. ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
14. D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, [online] Available: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>.
15. D695 – 15. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics1, [online] Available: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D695.6642.pdf>.
16. D790 – 17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, [online] Available: <https://asrecomposite.com/wp-content/uploads/2021/07/ASTM-D-790-2017.pdf>.

### References

1. Iftekar, S. F., Aabid, A., Amir, A., & Baig, M. (2023). Advancements and limitations in 3D printing materials and technologies: a critical review. *Polymers*, 15(11), 2519.
2. Qin, S., Dai, J., Tian, H., Zhang, H., Huang, J., Guan, T., ... Wan, J. (2025). 3D printing driving innovations in extreme low-temperature energy storage. *Virtual and Physical Prototyping*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2459798>.
3. Malik A, Ul Haq MI, Raina A, Gupta K (2022), "3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges". *Industrial Robot*, Vol. 49 No. 3 pp. 491–511, doi: <https://doi.org/10.1108/IR-10-2021-0247>.
4. Badogu, K., Kumar, R. & Kumar, R. 3D Printing of Glass Fiber-Reinforced Polymeric Composites: A Review. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 103, 1285–1301 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00873-1>.
5. Manchenko, O., Nizhnik, V., Kuryliuk, O., Iukhymenko, N., Budzinska, V. (2024). Some Features of the Chemical Plasticization of Polymers Without Side Groups. In: Fesenko, O., Yatsenko, L. (eds) *Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications*. NANO 2023. Springer Proceedings in Physics, vol 253. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67519-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67519-5_6).
6. Verbeeten W. M. H. and Lorenzo-Bañuelos, M. Material Extrusion Additive Manufacturing of Poly (Lactic Acid): Influence of infill orientation angle. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 59. P. 10307911-16. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103079
7. Turner B., Strong R. and Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes : I. Process design and modeling. *Rapid Prototyp J*. 2014. Vol. 20, no. 3. P. 192–204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012
8. Zhuang Y., Zou B., Ding S. and Wang P. Shear and Tensile Behaviors of Fiber-Reinforced Resin Matrix. *Composites Printed by the FDM Technology*. *Coatings*. 2022. Vol. 12. P. 1000-1-13. DOI: 10.3390/coatings12071000
9. Rijckaert S. et al. Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication. *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 298-1-16. DOI: 10.3390/polym14020298
10. Орел В. М., Козловська Т. Ф., Саленко О. Ф., Мельничук П. П. (2025) Post-processing of engineering components produced using additive layer-by-layer modeling techniques. *Tekhnichna inzheneriia*. 2025. № 1 (95). P. 76-93. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93)
11. Kostrzhitskyi A. I. Kalinov O. Yu., Tishchenko V. M., Berehova O. M. (2008) *Physical and Colloid Chemistry*. Kyiv : Tsentr uchbovoi literatury. 496 p.
12. Pidhorna L. P., Cherkashyna H. M., Lebedev V. V. (2015) *Theory and Methods of Research and Testing of Plastics, Adhesives, and Sealants: A Textbook*. Kharkiv : NTU «KhPI». 276 p.
13. ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
14. D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, [online] Available: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>.
15. D695 – 15. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics1, [online] Available: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D695.6642.pdf>.
16. D790 – 17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, [online] Available: <https://asrecomposite.com/wp-content/uploads/2021/07/ASTM-D-790-2017.pdf>.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026