

АНАЛІЗ ТЕРМІЧНОЇ УСАДКИ ПОЛІМЕРІВ ABS ТА PLA В ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТОДОМ FDM

Михальова А.Г., Коротецький М. С.

anastasiia.mykhalova@nure.ua, mykyta.korotetskyi@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., проф. Колендовська М.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС,
м. Харків, Україна

Additive manufacturing, particularly Fused Deposition Modeling (FDM), is widely used for rapid prototyping, but ensuring dimensional accuracy and geometric stability remains a challenge. A major cause of defects is the thermal shrinkage of polymer materials, which generates residual stresses leading to warping, delamination, and poor adhesion to the build platform. This study analyzes the mechanisms of thermal deformation during FDM printing and compares the shrinkage behavior of ABS and PLA polymers. Methods for minimizing shrinkage through temperature control and optimization of printing parameters are also systematized.

Адитивне виробництво, зокрема технологія пошарового наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM), є однією з найбільш поширених технологій швидкого прототипування [1, 2]. Незважаючи на її гнучкість та доступність, досягнення високої точності розмірів та стабільності геометрії виробів залишається актуальною науково-технічною задачею. Ключовим обмежуючим фактором є термічна усадка полімерних матеріалів, яка призводить до виникнення значних залишкових напружень у структурі виробу [2]. Ці напруження є першопричиною таких дефектів, як короблення (warping), відрив моделі від платформи та міжшарове розшарування (деламінація), що суттєво знижує якість та функціональність кінцевого продукту.

Метою даної роботи є аналіз причин термічної деформації, порівняння властивостей полімерів ABS і PLA в контексті їх схильності до усадки та систематизація науково обґрунтованих методів її мінімізації.

Процес FDM характеризується циклічним нагріванням матеріалу до стану плинності та його подальшим швидким охолодженням. Екструдований шар полімеру, контактуючи з попереднім, холоднішим шаром, створює значний градієнт температур. Нерівномірний розподіл температури по об'єму деталі призводить до диференційованого термічного стиснення. Шари, що охолоджуються, прагнуть зменшитися в об'ємі, однак їхньому руху перешкоджають вже затверділі нижні шари. Це протистояння генерує внутрішні залишкові напруження. Коли ці напруження перевищують адгезійну міцність зв'язку між шарами або між першим шаром і робочою платформою, виникають видимі деформації.

На величину усадки впливає молекулярна структура полімеру:

– ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол) – аморфний термопласт із високим коефіцієнтом теплового розширення. Його усадка є значною і вимагає ретельного контролю температурного режиму в процесі друку для запобігання деформаціям;

– PLA (Полілактид) – напівкристалічний полімер. Його усадка зумовлена не лише тепловим стисненням, а й процесом кристалізації. Попри це, загальна величина його усадки є суттєво нижчою, ніж у ABS, що спрощує процес друку [2].

Вибір матеріалу є визначальним фактором у боротьбі з усадкою. ABS та PLA, хоч і є найпопулярнішими філаментами, демонструють протилежні характеристики.

ABS характеризується високою ударною в'язкістю та термостійкістю (температура склування $\sim 105^\circ\text{C}$), що робить його придатним для функціональних компонентів. Однак високий коефіцієнт усадки (0.4–0.8%) та потреба у високій температурі екструзії (220–250 $^\circ\text{C}$) створюють значні технологічні труднощі [1]. Його застосовують в автомобільній промисловості (деталі інтер'єру), корпуси для PEA, функціональні прототипи, компоненти, що працюють в умовах підвищених температур та механічних навантажень.

PLA є біосумісним та біорозкладним матеріалом, що має низький коефіцієнт усадки (0.2–0.4%) і не виділяє токсичних випарів при друці. Його низька температура склування ($\sim 60^\circ\text{C}$) обмежує застосування в умовах нагріву, проте значно спрощує процес друку, оскільки ризик короблення мінімальний [2]. Температурний діапазон його обробки (190–220 $^\circ\text{C}$) є нижчим, що знижує енергетичні витрати. PLA застосовують у швидкому прототипуванні, концептуальних та освітніх моделях, декоративних об'єктах, пакувальних матеріалах, тимчасових медичних імплантатах.

Таблиця 1. Порівняння ключових властивостей ABS та PLA.

Властивість	ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол)	PLA (Полілактид)
Температура склування (Tg)	$\sim 105^\circ\text{C}$	$\sim 60^\circ\text{C}$
Температура екструзії	220–250 $^\circ\text{C}$	190–220 $^\circ\text{C}$
Коефіцієнт усадки	Високий (0.4–0.8%)	Низький (0.2–0.4%)
Залишкові напруження	Високі	Низькі
Вимоги до термоконтролю	Обов'язкова закрыта камера та підігрів столу	Підігрів столу бажаний, закрыта камера не обов'язкова

Для керування усадкою та напруженнями застосовують комплексний підхід, що поєднує апаратні та програмні методи [1, 2].

Апаратні методи (контроль температури):

1. Підігрів платформи (heated bed) – зменшує температурний градієнт між моделлю та платформою, покращуючи адгезію та знижуючи напруження.
2. Термостабілізована камера (enclosed chamber) – підтримує високу температуру середовища, що забезпечує повільне, рівномірне охолодження і значно зменшує залишкові напруження.

Програмні методи (оптимізація параметрів):

1. Збільшення адгезії – використання допоміжних структур, як-от brim (облямівка) та raft (пліт), для кращого зчеплення з платформою.
2. Керування охолодженням – для abs обдув вимикається, тоді як для pla інтенсивне охолодження є необхідним для стабілізації геометрії.
3. Вибір заповнення – концентричні або стільникові типи заповнення (infill) ефективніше знижують внутрішні напруження, ніж лінійні.

Порівняльний аналіз термічної усадки полімерів ABS та PLA показав, що характер деформацій безпосередньо залежить від молекулярної структури матеріалу та умов термоконтролю під час процесу FDM-друку. Аморфний ABS демонструє вищий рівень залишкових напружень і схильність до короблення, тоді як напівкристалічний PLA характеризується нижчим коефіцієнтом усадки та стабільнішою геометрією виробів. Разом із тим ABS переважає за показниками ударної в'язкості та термостійкості, що визначає його застосування у функціональних і навантажених деталях, тоді як PLA є оптимальним для прототипування, навчальних і декоративних моделей. Вибір полімеру має ґрунтуватися на поєднанні вимог до механічних властивостей, точності виготовлення та стабільності процесу друку, що дозволяє мінімізувати термічні деформації й забезпечити високу якість кінцевого виробу.

Список використаних джерел:

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing [Технології адитивного виробництва: 3D-друк, швидке прототипування та пряме цифрове виробництво]. New York : Springer, 2015. 498 с.
2. Chacón J. M., Caminero M. A., García-Plaza E., Núñez P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection [Адитивне виготовлення структур з PLA методом FDM: вплив параметрів процесу на механічні властивості]. Materials & Design. 2017. Т. 124. С. 143–157.