

<https://doi.org/10.15407/plit2025.03.072>

УДК 621.745.55

І.В. Лук'яненко, канд. техн. наук, доцент, доцент; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Б.В. Кивгило, асистент; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

Є.Г. Биба, канд. техн. наук, доцент, доцент; e-mail: byba.evgen@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

М.М. Ямшинський, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри; e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

А.В. Мініцький, докт. техн. наук, професор, професор; e-mail: aminitsky@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

ВИЗНАЧЕННЯ ОКРЕМИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ ІЗ ФОТОПОЛІМЕРНИХ СМОЛ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ LCD-ДРУКУ

У роботі здійснено порівняльний аналіз традиційних модельних матеріалів, таких як парафіно-стеаринова суміш, та сучасних фотополімерних смол, що використовуються в технології лиття за моделями, які витоплюють. Особливу увагу приділено фотополімерному матеріалу Castable Blend Resin (FunToDo), який застосовується в адитивних технологіях (SLA, DLP та LCD-друк). Досліджено основні характеристики, що впливають на придатність моделей із даного матеріалу для виготовлення виливків, зокрема: шорсткість поверхні надрукованих моделей, зольність матеріалу, а також мінімально допустиму товщину стінок моделей. Установлено, що фотополімерні моделі демонструють прийнятну якість поверхні ($R_a \approx 2,21$ мкм), хоча й поступаються традиційним за показником шорсткості. Водночас фотополімери дозволяють отримувати моделі складної геометрії з високою точністю, що практично неможливо для моделей із парафіно-стеаринових композицій, виготовлених за класичними технологіями. Зольність фотополімеру Castable Blend Resin складає 0,98 %, що суттєво перевищує аналогічний показник традиційних матеріалів, проте може бути прийнятною за умови ретельного контролю режиму випалювання та очищення форм. Також встановлено, що мінімальна товщина стінки моделі, яка забезпечує стабільність друку, становить 1,0 мм. Зразки з меншою товщиною стінки моделі (0,5 мм) були нестійкими і руйнувалися в процесі друку. Отримані результати підтверджують можливість використання фотополімерних смол як альтернативи традиційним модельним матеріалам у литті за моделями, які витоплюють, особливо в процесі виготовлення складних та дрібнодеталізованих виливків. Разом із тим необхідність точного підбору режимів друку й видалення модельного матеріалу з порожнини ливарної форми, а також порівняно висока зольність зумовлюють актуальність подальших досліджень для оптимізації параметрів фотополімерів у ливарних процесах.

Ключові слова: фотополімерна смола, 3D-друк, бронза, лиття за моделями, які витоплюють, спеціальні способи лиття.

Вступ

Технологія лиття за моделями, які витоплюють, є однією із найважливіших у ливарному виробництві для виготовлення виливків високої точності, що їх використовують у різних галузях промисловості. Ця технологія передбачає одноразове використання

моделі, яку вилучають із ливарної форми в процесі її виготовлення, зазвичай нагріванням останньої до температур 80–100 °C у камерних печах або за допомогою гарячої води на спеціалізованих установках [1]. Однак модельний матеріал у процесі цієї операції часто неможливо повною мірою видалити з порожнини ливарної форми, що зумовлено її конфігурацією. У такому випадку залишки модельного матеріалу згорають у формі в процесі її прожарювання. Тверді продукти згорання залишаються в порожнині форми, що призводить до погіршення якості поверхні литого виробу. Це особливо важливо під час виготовлення тонкостінних ажурних ювелірних та художніх виливків, оскільки, крім погіршення якості поверхні, ці залишки можуть ставати причиною недоливів тонкостінних елементів, додатково зменшуючи і без того невелику площу перерізу порожнини форми, по якій повинен протекти розплав [1–3].

Однією з ключових характеристик модельних матеріалів є зольність — масова частка твердого залишку після термічного розкладання. Низька зольність є необхідною умовою для забезпечення чистоти ливарної форми та якості виливків. Як засвідчують дослідження [1, 2, 4, 5], зольність традиційних модельних матеріалів знаходиться в межах 0,03–0,1 %, що цілком узгоджується з нормативними вимогами сучасних промислових технологічних процесів. Ці матеріали легко витоплюються під час нагрівання, залишаючи мінімальний залишок, що зменшує ризик утворення дефектів у виливку з вини форми. Парафіно-стеаринові суміші є стандартом у технології лиття за моделями, які витоплюють, завдяки своїм стабільним характеристикам. Наприклад, у роботі [1] описано технологію виготовлення моделей із парафіно-стеаринових сумішей, де підкреслюється їх здатність повністю витоплюватися з форми при температурі 60–80 °C, що дозволяє забезпечити чистоту оболонкової форми. Інші традиційні матеріали, такі як церезин, також мають низьку зольність (не більше 0,03 %) і високу стабільність під час витоплення. Однак їх механічні властивості, як-от міцність і пластичність, поступаються парафіно-стеариновим сумішам, що обмежує їх застосування для виготовлення складних моделей.

Останніми роками набули значного поширення, завдяки здатності забезпечувати високоточне відтворення складних геометричних форм, адитивні технології (SLA, DLP, LCD), що базуються на використанні фотополімерних смол [6–12]. Такі властивості критично важливі для виготовлення ливарних моделей у процесах лиття за моделями, які засвідчують дослідження витоплюють. Ці матеріали полімеризуються під дією ультрафіолетового (УФ) випромінювання, що дозволяє досягти надзвичайно тонкої деталізації, часто недоступної при використанні традиційних модельних матеріалів.

Основною перевагою адитивних технологій друку фотополімерними смолами є висока роздільна здатність друку, стабільність розмірів після затвердіння та сумісність із широким спектром цифрових 3D-технологій, що робить їх придатними для інженерного моделювання, прототипування та виготовлення моделей високої складності. Зокрема, технології DLP (Digital Light Processing) та LCD-друку (Liquid Crystal Display) дозволяють досягти значного скорочення часу виробництва за рахунок одночасного опромінення цілого шару, що відрізняє її від точкового опромінення, яке застосовується в SLA-друці (Stereolithography) [8, 10, 12].

Проте, згідно з сучасними дослідженнями [13], низка проблем, пов'язаних із термічними властивостями фотополімерних смол, обмежує їх повномасштабне використання в ливарному виробництві. Також, як і для традиційних матеріалів, однією з ключових характеристик фотополімерних смол є зольність, що має критичне значення у випадку виготовлення виливків високої точності. Надмірна зольність або нерівномірне вигорання фотополімеру може призводити до включень, дефектів поверхні або спотворення геометрії виливку. Типові значення зольності для фотополімерів, які використовуються для друку, знаходяться у дуже широких межах та загалом відповідають технологічним вимогам, однак можуть варіюватися залежно від складу смоли, умов фотополімеризації і температурного режиму випалювання.

Крім того, варто зазначити, що поведінка фотополімерів під час термічного

Проблеми технології форми

розкладання є складною багатостадійною реакцією, яка супроводжується виділенням летких органічних сполук і продуктів неповного згоряння. Це потребує точного контролю температурного режиму лічного простору та умов вентиляції. У певних випадках доцільно використовувати поетапне термічне розкладання або модифікацію рецептури смоли для зниження зольності й поліпшення процесу вигорання, а також дотримуватись рекомендацій виробників [13]. Узагальнені характеристики окремих типів фотополімерних смол і традиційних модельних матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця характеристик поширених фотополімерних смол і традиційних модельних матеріалів

Характеристика	Фотополімерні смоли (стандартні)	Смоли для лиття (castable resin)	Смоли з низькою зольністю	Традиційні модельні матеріали
Призначення	прототипування, візуальні моделі	моделі для прецизійного лиття	високоточне лиття	моделі, що витоплюють у ливарному виробництві
Технологія сумісності	SLA, LCD	SLA, DLP, LCD	DLP, SLA	прес-форми, лиття, механічне формування
Зольність після випалювання	1–5 %	0,1–0,3 %	< 0,05 %	< 0,05 %
Температура повного вигорання	~ 250 °C	250–350 °C	300–400 °C	200–400 °C
Форма залишку після випалу	об'ємна зола	мінімальна зола	майже повна відсутність золи	відсутній або мінімальний слід
Деталізація (XY resolution)	50–100 мкм	25–50 мкм	20–50 мкм	100–500 мкм
Стабільність розмірів під час друку	висока	висока	висока	—

З таблиці можна зробити висновки, що фотополімерні смоли для лиття (castable resin), наприклад FunToDo (Фінляндія), eSUN (КНР), мають кращі економічні показники, дозволяють виготовляти моделі з високою точністю та складністю геометрії, однак проблеми з вигоранням і зольністю залишаються критичними для складних форм. У той же час смоли з низькою зольністю, наприклад Formlabs (США), BlueCast X-One (Італія), Asiga Cast (Австралія), підходять для найвибагливіших ливарних задач, але потребують точно витриманих температурних профілів і мають значно вищу вартість [14–18].

Процес випалювання фотополімерних смол є складнішим, ніж витоПЛення традиційних матеріалів, оскільки вимагає точного контролю температури, атмосфери й тривалості нагрівання. Неповне випалювання може призвести до утворення вуглецевих залишків або тріщин у ливарній формі. Автори робіт [13, 19, 20] описали аналогію між литтям за випалюваними моделями та литтям за газифікованими моделями, де підкреслюється необхідність ретельного видалення матеріалу для уникнення дефектів. Деякі дослідження вказують на можливість використання спеціальних добавок у фотополімерних смолах для зниження зольності, але такі розробки перебувають на ранніх етапах [13]. Крім того, випалювання смол може

супроводжуватися викидом токсичних газів, що потребує додаткових заходів безпеки та вентиляції.

Порівняння традиційних і сучасних матеріалів показує, що парафіно-стеаринові суміші мають перевагу в низькій зольності та простоті витоплення, але обмежені в точності моделей. Фотополімерні смоли переважають у створенні складних геометрій, але їх зольність і поведінка під час випалювання залишаються недостатньо дослідженими.

Таким чином, незважаючи на значні переваги фотополімерних матеріалів, подальші дослідження, спрямовані на оптимізацію їх термічних характеристик і підвищення технологічної сумісності з ливарними процесами, залишаються актуальними.

Матеріал та методи

Метою роботи є оцінка властивостей фотополімерного матеріалу Castable Blend Resin від виробника FunToDo для виготовлення ливарних моделей, а також вивчення впливу технологічних параметрів 3D-друку на якість моделей і подальших виливків.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- дослідити шорсткість поверхні надрукованих моделей і порівняти її з показниками шорсткості моделей, виготовлених традиційними методами (для визначення шорсткості використовували мобільний профілометр MarSurf PS10);
- визначити зольність матеріалу Castable Blend Resin та оцінити його придатність для виготовлення виплавлюваних моделей;
- визначити мінімально допустиму товщину стінки моделей, при якій забезпечується стабільний друк без спотворення геометрії (для друку моделей використовували 3D-принтер Anycubic Photon S).

Проведені дослідження дозволять обґрунтовувати вибір фотополімерного матеріалу та режимів друку для виготовлення якісних ливарних моделей із використанням адитивних технологій.

Результати і обговорення

Для фотополімерних смол, що позиціонуються виробниками на ринку як сучасні модельні матеріали для технології лиття за моделями, які витоплюють, значення зольності часто є невідомим. Варто зауважити, що частина фотополімерних смол для моделей не витоплюється попередньо після формування в класичному розумінні цього процесу, а випадає із форми — переходить у газову фазу безпосередньо в процесі її прожарювання, що в подальшому може суттєво вплинути на якість виробу.

Використання технології друку накладає певні обмеження на конфігурацію та якість поверхні моделі. Ці обмеження зумовлені особливостями конкретної технології й технічними характеристиками устаткування, на якому вона реалізована. Для проведення досліджень використовували налаштування, які рекомендовані виробником фотополімерного матеріалу та забезпечують максимальну якість поверхні моделі:

- товщина шару 50 мкм;
- швидкість піднімання платформи 100 мм / хв;
- затримка друку 2 с;
- час опромінювання перших шарів 90 с;
- час опромінювання решти шарів 8,7 с;
- розширення екрану 2560–1440 пікселів.

Якість поверхні моделей є одним із ключових факторів, що визначає точність і чистоту поверхні готових виливків. Для порівняльного дослідження були виготовлені зразки двох типів: за класичною технологією лиття за моделями, що їх витоплюють із використанням парафіно-стеаринової композиції ПС 50–50 (рис. 1, а), та за допомогою фотополімерного 3D-друку з матеріалу Castable Blend Resin (виробник FunToDo) (рис. 1, б).

Обидва типи зразків були виготовлені з урахуванням схожості геометричних параметрів і умов подальшого випалювання. Парафіно-стеаринові зразки мали середнє значення шорсткості поверхні $Ra \approx 1,35$ мкм, що є типовим показником для моделей, виготовлених пресуванням без подальшої обробки. Фотополімерні зразки,

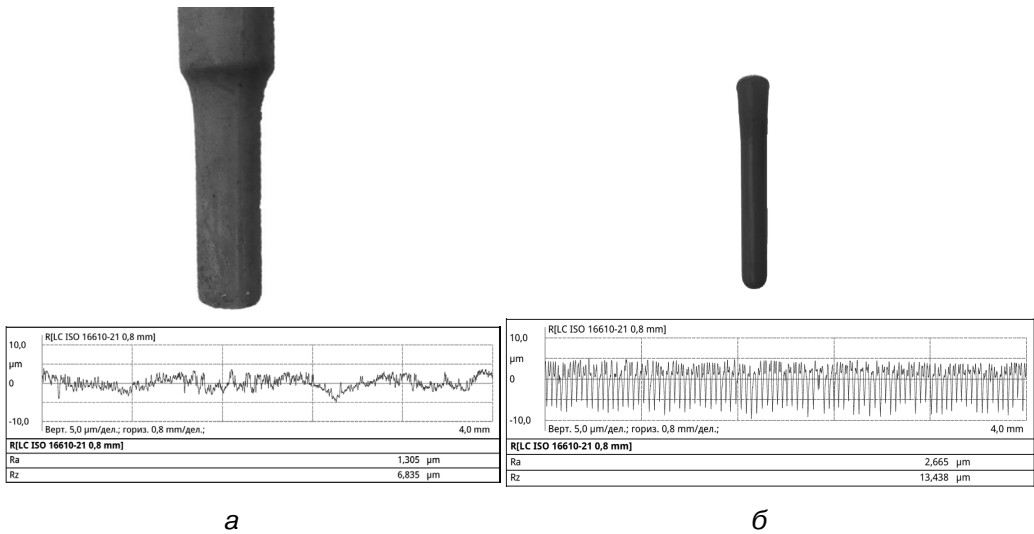


Рис. 1. Загальний вигляд та профілограма поверхні зразків виготовлених за класичною технологією (а) і надрукованих із фотополімерної смоли (б)

надруковані з роздільною здатністю 50 мкм, демонстрували якість поверхні на рівні $Ra \approx 2,21 \text{ мкм}$, що на $\approx 40 \%$ нижче, ніж у традиційних аналогів.

Візуальний аналіз зразків показав, що поверхня фотополімерних моделей була гладкою, з чітко відтвореними деталями, включаючи дрібні елементи геометрії. У той же час парафінові зразки мали більшу кількість мікродфектів, зумовлених нерівномірним охолодженням, усадкою та мікротріщинами на поверхні. Незважаючи на невелику різницю в початковій шорсткості моделей, на етапі отримання виливків відмінності в шорсткості частково нівелюються, зокрема, через властивості оболонкової форми та в'язкість розплавленого металу. Тим не менше моделі з меншою шорсткістю поверхні дозволяють зменшити потребу в механічній обробці готових виливків.

Дослідження зольності здійснювали за критичним температурами від виробника 160°C та 740°C . результати дослідження показано на рис. 2.

У результаті дослідження встановлено, що зразки із фотополімерного матеріалу, який призначений для виготовлення моделей, що їх витоплюють, демонструють зольність на рівні $0,98 \%$, що орієнтовно в 10–30 разів перевищує зольність промислового модельного матеріалу ПС 50-50. Тверді продукти термодеструкції матеріалу

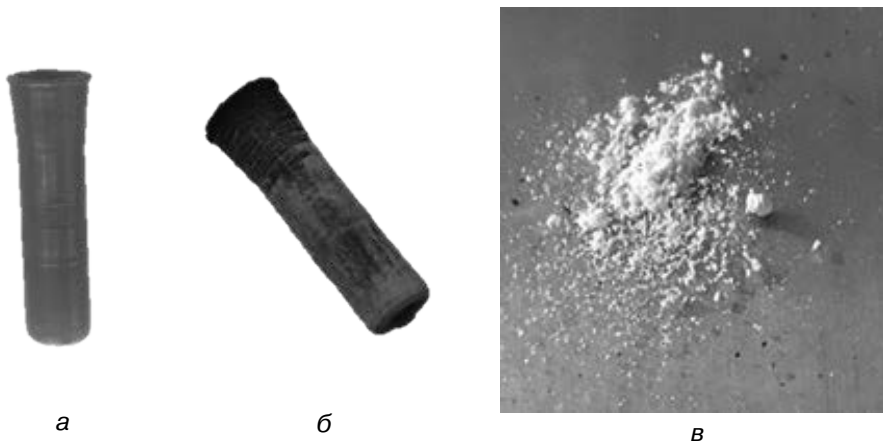


Рис. 2. Загальний вигляд фотополімерних зразків: а — після друку; б — після прожарювання при температурі 160°C ; в — після прожарювання при температурі 740°C

залишаються в ливарній формі, що може спотворити конфігурацію виливка або повністю заблокувати рух розплаву порожниною ливарної форми. Однак, варто зауважити, що стан твердих продуктів термодеструкції дозволяє видалити їх із форми шляхом її продування, наприклад стисненим повітрям. Хоча ця операція може негативно вплинути на прожарену форму з гіпсо-кремнеземистої суміші та призвести до її розтріскування. Незважаючи на наявність залишкової золи, її кількість є прийнятною для ливарного виробництва, за умови коректного підбору режиму випалювання та очищення форми. Зауважимо, що структура зразків залишалась стабільною під час виготовлення керамічної оболонки, а отримана форма забезпечила отримання виливка.

Таким чином, якість виготовлених фотополімерних зразків є задовільною для використання в технологічному процесі виготовлення виливків за моделями, які витоплюють. За певних умов фотополімер може бути застосований як альтернатива класичним моделям, особливо у випадках складної геометрії, що її на практиці дуже недоцільно або навіть неможливо реалізувати шляхом запресовування модельного матеріалу. Мінімальна товщина шару від 25 до 50 мкм дозволяє друкувати складні моделі з дуже низькою шорсткістю без додаткового оброблення перед формуванням керамічної оболонки.

Наступним кроком в роботі стало дослідження параметрів друку на якість моделей. Одним із варіантів оптимізації витрати фотополімерного матеріалу є виготовлення тонкостінних моделей. Для дослідження було спроектовано циліндричні моделі з ливниковими воронками. Діаметр циліндричної частини становив 12 мм, а загальна висота моделі — 50 мм (див. рис. 1, б). Товщину стінок моделі змінювали у діапазоні від 0,5 мм до 2,0 мм із кроком 0,5 мм. Загальний вигляд надрукованих моделей показано на рис. 3.

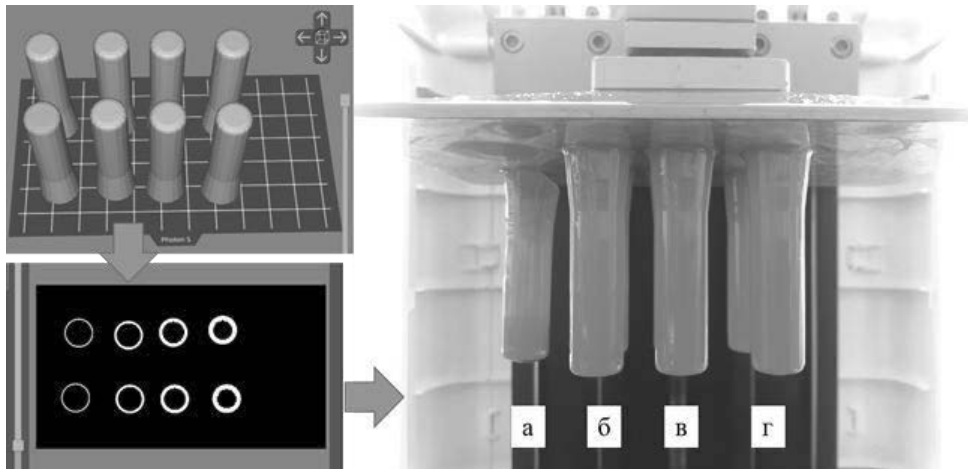


Рис. 3. Загальний вигляд надрукованих моделей із різною товщиною стінки: а — 0,5 мм; б — 1,0 мм; в — 1,5 мм, г — 2,0 мм

Для створення товстостінних або суцільних моделей витрати фотополімерної смоли суттєво збільшується, що призводить до значного погіршення техніко-економічних показників технології. Перш за все через високу ринкову вартість фотополімерного матеріалу та збільшення його кількості у формі, яку необхідно випалити. Хоча на час виготовлення моделі за технологією LCD-друку площа її перерізу не впливає.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що моделі із товщинами стінок у діапазоні від 1,0 до 2,0 мм були надруковані без дефектів, із чітким відтворенням геометрії, без спотворень або розшарування. Моделі надруковано рівномірно, без ознак перегрівання чи недостатньої полімеризації. Модель із товщиною стінки 0,5 мм

Проблеми технології форми

не витримала механічних і термічних навантажень у процесі друку, внаслідок чого була зруйнована на етапі формування перших шарів. Це свідчить про недостатню механічну міцність і нестабільність тонких стінок під час адитивного виробництва за технологією LCD за даних умов.

Зазначені результати узгоджуються з технологічними обмеженнями LCD-друку, де надмірно тонкі елементи схильні до відриву від платформи, деформації під час полімеризації та навіть перегрівання за умови недостатнього охолодження.

Таким чином, мінімально допустима товщина стінки фотополімерної моделі для гарантованої стабільності процесу друку становить не менше 1,0 мм. Зменшення цього параметра значно підвищує ймовірність дефектів та унеможливорює отримання виробу, придатного до подальшого застосування у ливарному виробництві.

На основі виготовлених моделей було сформовано форми-моноліти із гіпсо-кремнеземної суміші «Prestige Sigma» відповідно до традиційної технології лиття за моделями, що витоплюють. Температура прожарювання форми становила 950 °С, температура форм перед заливанням бронзи БрО5Ц5С5 — 550 °С. Загальний вигляд виливків показано на рис. 4.

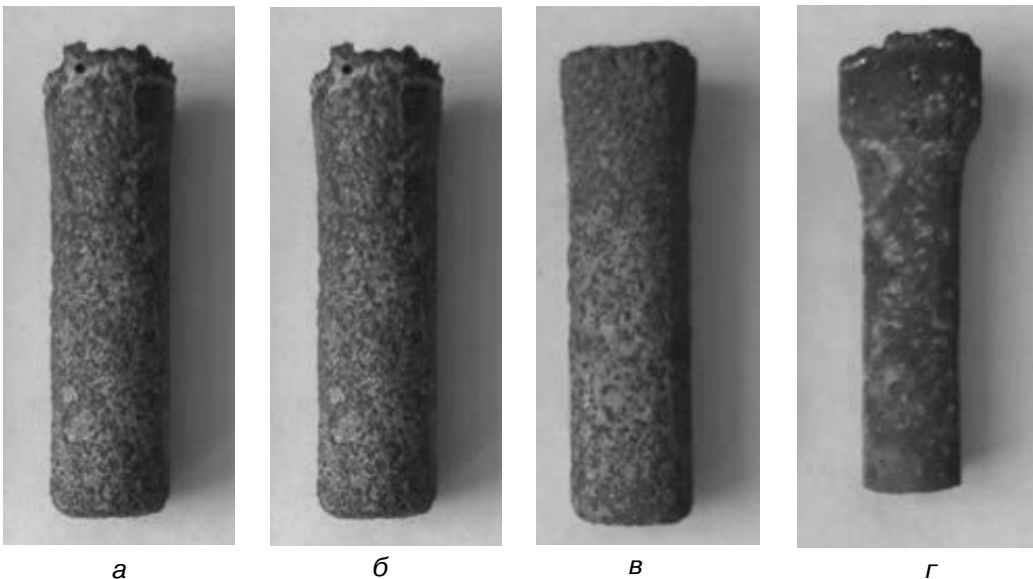


Рис. 4. Загальний вигляд отриманих виливків: а — товщина стінки моделі 1,0 мм; б — товщина стінки моделі 1,5 мм; в — товщина стінки моделі 2,0 мм, г — модель з ПС 50-50

У межах дослідження було здійснено порівняльну оцінку шорсткості поверхні виливків, отриманих за різними типами моделей: фотополімерними (виготовленими методом LCD-друку) і традиційними — з парафіно-стеаринової композиції (ПС 50-50). Визначення параметрів шорсткості проводилось за стандартним критерієм середньої арифметичної висоти нерівностей профілю Ra. Різниця шорсткості поверхонь отриманих виливків не перевищує 10 % та перебуває у межах Ra 9,1-9,9 мкм. Для порівняння, шорсткість виливка, виготовленого за моделлю із композиції ПС 50-50, становить Ra 9,3 мкм (рис. 5). Отримані результати дозволяють зробити висновок, що тип моделі (фотополімерна чи парафінова) не справляє суттєвого впливу на кінцеву шорсткість виливка, за умови однакових параметрів формування форми моноліту та режимів заливання металу. Незначні коливання шорсткості можуть бути пов'язані з мікрорельєфом внутрішньої поверхні форми, в'язкістю сплаву, а також впливом температурних градієнтів під час заливання.

Той факт, що виливки за фотополімерними моделями продемонстрували не вищу шорсткість, ніж за класичними аналогами, підтверджує технологічну придатність LCD-друку для виготовлення ливарних моделей не лише з точки зору геометричної точності, але й з погляду параметрів поверхні кінцевого виробу.

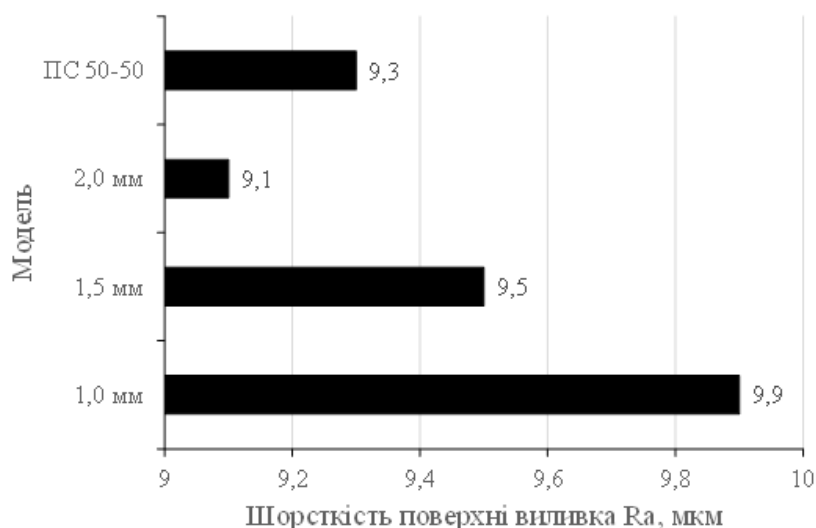


Рис. 5. Шорсткість поверхні отриманих виливків

Отже, можна зробити висновок, що технологія виготовлення виливків за надрукованими моделями забезпечує шорсткість поверхні виливка на рівні шорсткості виливків, виготовлених за класичним варіантом технології лиття за моделями, які витоплюють. Також надруковані моделі мають нульову усадку, на відміну від класичних модельних композицій, та спрощені умови для зберігання перед виготовленням форми, оскільки не змінюють конфігурацію під дією підвищених температур робочої зони та прямих сонячних променів, наприклад, улітку.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило доцільність використання фотополімерного матеріалу Castable Blend Resin (виробник — FunToDo) у технології лиття за моделями, які витоплюють виготовленими методом LCD-друку. Установлено, що:

- зольність досліджуваного фотополімеру складає 0,98 %, що є прийнятним показником для процесів лиття за моделями, які витоплюють, але накладає певні обмеження на його використання для виготовлення тонкостінних ажурних виливків;
- шорсткість поверхні надрукованої моделі знаходиться на рівні Ra 2,21 мкм, що приблизно на 40 % нижче, ніж у моделей, виготовлених методом запресування, і свідчить про високу якість поверхні друку;
- мінімальна рекомендована товщина стінки моделі повинна бути не менше 1,0 мм, що забезпечує стабільність геометрії та достатню механічну міцність при подальшому формоутворенні;
- термічна стабільність і відсутність усадки у надрукованих моделях дозволяє уникнути внесення додаткових поправок у проектну геометрію, що спрощує технологічний процес і підвищує точність виливків;
- моделі, надруковані з даного матеріалу, стійкі до впливу зовнішнього середовища, включаючи пряме сонячне світло, що забезпечує зручність їх зберігання і транспортування.

Таким чином, результати дослідження демонструють високий потенціал фотополімерів, зокрема Castable Blend Resin, для впровадження у лиття за моделями, які витоплюють, в умовах сучасного виробництва із застосуванням технологій 3D-моделювання друку.

References

- 1 Nunes R. M., Abbaschian G. J., Abramowitz H., Agarwal R. (eds.). (2008). *ASM Handbook* (Vol. 15). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.9781627081870>
- 2 Philip R. Beeley, Robert F. Smart. (2009). *Investment Casting*. London: CRC Press. 498 p. <https://doi.org/10.1201/9781003419228>
- 3 Fedorov, K., Ravindran, C., & Fayazbakhsh, K. (2023). *Effects of process parameters on friability and surface quality in the rapid investment casting process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 125, 731–742. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10777-0>
- 4 Tewo, R., Rutto, H., Focke, W., Seodigeng, T. & Koech, L. (2019). Formulations, development and characterization techniques of investment casting patterns. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(3), 335–349. <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0068>
- 5 A. Karwiński, S. Młodnicki, R. Pabiś, I. Robak, G. Kubosz. (2011) New generation of pattern materials for investment casting. *Archives of foundry engineering*. 11(1), pp. 53–56 https://www.researchgate.net/publication/267225528_A_R_C_H_I_V_E_S_of_111_New_generation_of_pattern_materials_for_investment_casting
- 6 Bourell, D. L., Frazier, W., Kuhn, H., & Seifi, M. (Eds.). (2020). *ASM Handbook* (Vol. 24). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v24.9781627082907>
- 7 Abbasi, M., Váz, P., Silva, J., & Martins, P. (2025). Head-to-head evaluation of FDM and SLA in additive manufacturing: Performance, cost, and environmental perspectives. *Applied Sciences*, 15(4), 2245. <https://doi.org/10.3390/app15042245>
- 8 Wang, Y., Li, X., Chen, Y., & Zhang, C. (2021). Strain rate dependent mechanical properties of 3D printed polymer materials using the DLP technique. *Additive Manufacturing*, 47, 102368. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102368>
- 9 Bolugoddu Sandeep, T.T.M. Kannan, J. Chandradass, M. Ganesan, A. John Rajan (2021). Scope of 3D printing in manufacturing industries-A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6941–6945. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.394>
- 10 Joseph Borrello, Philip Nasser, James C. Iatridis, Kevin D. Costa (2018). 3D printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial DLP-SLA printer. *Additive Manufacturing*, 23, 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.019>
- 11 Soyeon Park, Wan Shou, Liane Makatura, Wojciech Matusik, Kun (Kelvin) Fu (2022). 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. *Matter*, 5, 43–76. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>
- 12 Jui-Fu Tang, Kuan-Wu Lin, Tsung-Hsien Lin, Wei-Chun Lin (2025). Pioneering techniques for achieving high-resolution, ultrasmooth surfaces via LCD 3D printing technology. *Additive Manufacturing*, 103, 104764. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104764>
- 13 Sameni, F., Ozkan, B., Karmel, S., Engstrøm, D. S., & Sabet, E. (2022). Large scale vat-photopolymerization of investment casting master patterns: The total solution. *Polymers*, 14(21), 4593. <https://doi.org/10.3390/polym14214593>
- 14 FunToDo. (n.d.). *Castable Blend*. FunToDo. <https://funtodo.eu/shop/castable-blend/castable-blend/>
- 15 eSUN. (n.d.). *Castable Resin for Jewelry Product*. eSUN. <https://www.esun3d.com/castable-resin-for-jewelry-product/>
- 16 Formlabs. (n.d.). *Casting resins*. Formlabs. <https://formlabs.com/global/materials/?category%5B0%5D=casting>
- 17 BlueCast. (n.d.). *X-One*. BlueCast. <https://www.bluecast.info/x-one>
- 18 Asiga. (n.d.). *Jewellery Materials – SuperWAX and others*. Asiga. <https://www.asiga.com/materials-jewellery/#superwax>
- 19 Singh, R., & Singh, J. (2016). Precision investment casting: A state of art review and future trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(9), 1562–1576. <https://doi.org/10.1177/0954405415597844>

- 20 Wang, S., Miranda, A. G., & Shih, C. (2010). A Study of Investment Casting with Plastic Patterns. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(12), 1482–1488. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.529585>

Received 02.05.2025

I. V. Lukianenko, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

B. V. Kyvgylo, Assistant; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

E. H. Byba, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: byba.evgen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

M. M. Yamshynskiy, Dr. Sci (Engin), Professor, Head of Department; e-mail: yamshynskiy@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>,

A. V. Minitskiy, Dr. Sci (Engin), Professor; e-mail: aminitsky@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine).

IDENTIFYING SOME TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF MODELS MADE OF PHOTOPOLYMER RESINS USING LCD PRINTING TECHNOLOGY

The paper deals with a comparative analysis of traditional modeling materials, such as paraffin-stearin mixture, and modern photopolymer resins used in the technology of investment casting. Particular attention is paid to the photopolymer material Castable Blend Resin (FunToDo), which is used in additive technologies (SLA, DLP and LCD printing). The main characteristics that affect the suitability of models made of this material for the production of castings were investigated, in particular: the surface roughness of printed models, the ash content of the material, and the minimum allowable wall thickness of the models. It has been established that photopolymer models demonstrate acceptable surface quality ($Ra \approx 2.21 \mu m$), although they are inferior to traditional ones in terms of roughness. At the same time, photopolymers make it possible to obtain models of complex geometry with high accuracy, which is practically impossible for models made of paraffin-stearin compositions using classical technologies. The ash content of the Castable Blend Resin photopolymer is 0.98%, which is significantly higher than that of traditional materials, but can be acceptable if the firing and cleaning of the molds is carefully controlled. It was also found that the minimum wall thickness of the model that ensures print stability is 1.0 mm. Samples with a smaller model wall thickness (0.5 mm) were unstable and destroyed during the printing process. The obtained results confirm the possibility of using photopolymer resins as an alternative to traditional model materials in investment casting, especially in the process of manufacturing complex and finely detailed castings. At the same time, the need for precise selection of printing modes and removal of model material from the mold cavity, as well as relatively high ash content, make further research to optimize the parameters of photopolymers in casting processes relevant.

Keywords: photopolymer resin, 3d printing, bronze, investment casting, special casting methods.