

заевтектоїдних сталей // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2022. – №4. – С. 33-38.

4. Новицкий В. Г., Гаврилюк В. П., Лахненко В. Л. Влияние углерода и меди на структуру литых сплавов системы Fe-Cr-Cu-C и их трибологические характеристики в условиях трения скольжения // Трение и износ. – 2015, т. 36. – №1, – С. 70-80.

5. Квасницька Ю. Г., Тарасевич М. І., Григоренко С. Г. Особливості структуроутворення заевтектоїдних сталей, легованих міддю // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2024. – №3. – С. 50-60.

Кивгило Б. В., Лук'яненко І. В., Ямшинський М. М.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)

**ОКРЕМІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЕЙ ІЗ
ФОТОПОЛІМЕРНИХ СМОЛ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ LCD-
ДРУКУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ВИТОПЛЮЮТЬ**
E-mail: lukianenkoiv@gmail.com

Технологія лиття за моделями, що витоплюють, є одним із найбільш точних методів ливарного виробництва для отримання деталей складної геометрії. Традиційно для виготовлення моделей використовують парафіно-стеаринові суміші, які характеризуються витоплюваністю за температура 60-80 °С та низькою зольністю (0,03-0,10 %) після прожарювання форми. Однак такі матеріали та класична технологія їх використання мають обмеження щодо відтворення складних форм і дрібних елементів.

Останніми роками активно впроваджуються адитивні технології (SLA, DLP, LCD), які базуються на використанні фотополімерних смол. Їхня головна перевага – можливість отримання високоточних моделей із деталізацією до 10-50 мкм, що практично недосяжно для традиційних технологій. Разом із тим, під час випалювання фотополімерів виникають проблеми, пов'язані із зольністю та видаленням продуктів термодеструкції.

Метою дослідження є оцінка властивостей фотополімерної смоли для виготовлення ливарних моделей методом LCD-друку та визначення її технологічних обмежень. Дослідження проводили з використанням фотополімерної смоли Castable Blend Resin (FunToDo) [1] на 3D-принтері Anycubic Photon S.

Результати проведених досліджень дозволяють оцінити доцільність і перспективність використання фотополімерних смол у технології лиття за моделями, що витоплюють. Передусім необхідно відзначити їхню ключову перевагу – здатність відтворювати складні тривимірні форми з високим рівнем деталізації. Традиційні парафіно-стеаринові суміші, що залишаються стандартом у промисловості, забезпечують низьку зольність і простоту видалення з форми, проте технологічно обмежені у відношенні досягнення дрібної геометрії та повторюваності результатів. У випадках ювелірного, художнього лиття або виготовлення дослідних зразків складної конфігурації саме адитивні технології з використанням фотополімерів демонструють найбільший потенціал.

Одним із визначальних параметрів є шорсткість поверхні моделей. За результатами вимірювань, надруковані фотополімерні моделі мали середнє значення $R_a \approx 2,21$ мкм, тоді як зразки з парафіно-стеаринової суміші – $R_a \approx 1,35$ мкм. Хоча номінально фотополімери поступаються за цим показником, слід враховувати, що якість поверхні у процесі виготовлення виливків значною мірою визначається внутрішнім рельєфом керамічної оболонки. Таким чином, різниця у вихідній шорсткості моделей у кінцевому підсумку практично нівелюється, що підтверджується виміряними значеннями R_a готових виливків (9,1-9,9 мкм). Це дозволяє стверджувати, що з точки зору кінцевої якості поверхні фотополімерні моделі цілком задовольняють технологічні вимоги виробництва.

Інший критично важливий параметр – зольність. Для фотополімеру Castable Blend Resin вона склала 0,98 %, що значно перевищує нормативні значення традиційних матеріалів (0,03-0,10 %). Висока зольність потенційно може призвести до появи включень та дефектів на поверхні виливка. Водночас, завдяки особливостям термодеструкції, більша частина твердих продуктів руйнування

може бути видалена із форми за допомогою продування. Це вимагає додаткових технологічних заходів, але не робить застосування фотополімеру неможливим. Варто зазначити, що за умови оптимізації режимів випалювання, використання ступінчастого нагрівання та належного підготовки форм кількість залишкової золи можна звести до рівня, який не впливає на якість лиття.

Особливу увагу слід звернути на механічну міцність моделей. В експериментах встановлено, що мінімальна товщина стінки для стабільного друку складає 1,0 мм. При товщині 0,5 мм моделі руйнувалися на початкових етапах формування шарів. Це пов'язано з обмеженнями самої технології LCD-друку – під час полімеризації відбувається значне тепловиділення, що при недостатній товщині призводить до деформації та втрати геометрії. Таким чином, для забезпечення відтворюваності та міцності доцільно дотримуватися товщини стінок $\geq 1,0$ мм.

Окрім технологічних характеристик, слід розглянути економічний аспект. Вартість фотополімерних смол значно перевищує ціну парафіно-стеаринових сумішей. Для виготовлення масових серій однотипних виливків це може стати обмежувальним чинником. Проте у випадках індивідуального виробництва, коли ключову роль відіграє точність і складність геометрії, економічний ефект від скорочення механічного оброблення та підвищення точності виправдовує витрати на матеріал. Додатково слід враховувати скорочення часу підготовчих операцій – 3D-друк дозволяє одразу виготовити модель потрібної форми, тоді як для традиційних матеріалів потрібне спеціальне оснащення.

З екологічної точки зору, використання фотополімерних смол пов'язане з утворенням летких органічних сполук та продуктів згоряння під час випалювання. Це вимагає наявності ефективної вентиляційної системи й спеціальних умов для безпечної утилізації відходів. Традиційні парафінові матеріали у цьому плані безпечніші, оскільки практично повністю вигорають без утворення твердого залишку. Водночас фотополімери забезпечують зменшення відходів у процесі виробництва моделей, оскільки друк відбувається безпосередньо з цифрової CAD-моделі без необхідності використання додаткових формувальних матеріалів. Таким

чином, екологічний баланс у застосуванні фотополімерів потребує подальшого вивчення, проте в перспективі може бути позитивним.

Варто також звернути увагу на стабільність фотополімерних моделей під час зберігання. На відміну від парафінових моделей, які чутливі до підвищених температур і деформуються під дією сонячного світла, фотополімери демонструють високу стабільність геометрії. Це спрощує їхнє транспортування, складування та використання у виробничому процесі, особливо в умовах високих температур у ливарних цехах.

Порівняння з результатами інших дослідників підтверджує доцільність застосування фотополімерних матеріалів у литті. У роботах [2-9] зазначається широкий діапазон значень зольності для різних типів смол, а також складність їхнього випалювання. Автори відзначають, що перспективним напрямом є розроблення смол з низькою зольністю, наприклад Formlabs Castable Wax [10] або BlueCast X-One [11], які забезпечують майже повне вигорання без залишку. Проте висока вартість цих матеріалів обмежує їхнє застосування у промислових масштабах. Таким чином, вибір конкретної смоли завжди повинен ґрунтуватися на компромісі між ціною, точністю та технологічною придатністю.

Додатково необхідно враховувати, що фотополімерні смоли відкривають нові можливості для інтеграції з цифровим виробництвом. Використання CAD/CAM-систем дозволяє безпосередньо переводити цифрову модель у фізичну без додаткових технологічних ланок. Це скорочує час розробки, усуває необхідність виготовлення прес-форми і робить технологію більш гнучкою. Для підприємств, що працюють за індивідуальними замовленнями або у сфері швидкого прототипування, така можливість є надзвичайно актуальною.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що фотополімерні смоли вже сьогодні здатні конкурувати з традиційними модельними матеріалами в умовах дрібносерійного та індивідуального виробництва. Їхні обмеження – висока зольність і вартість – компенсуються унікальними перевагами, такими як висока точність, складна геометрія, стабільність і відсутність усадки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення рецептури смол, оптимізацію режимів випалювання та розробку комплексних технологічних рішень, що дозволить забезпечити їх широке промислове впровадження.

Література

1. FunToDo Castable Blend. URL: <https://funtodo.eu/shop/castable-blend/castable-blend/> (дата звернення: 27.08.2025).
2. Bourell D. L., Frazier W., Kuhn H., Seifi M. (eds.) ASM Handbook. Vol. 24: Additive Manufacturing Processes. – ASM International, 2020. – 594 p.
3. Abbasi M., Váz P., Silva J., Martins P. Head-to-head evaluation of FDM and SLA in additive manufacturing // Appl. Sci. – 2025. – Vol. 15(4). – Article 2245.
4. Wang Y., Li X., Chen Y., Zhang C. Strain rate dependent mechanical properties of 3D printed polymer materials using the DLP technique // Addit. Manuf. – 2021. – Vol. 47. – Article 102368.
5. Bolugoddu S., Kannan T., Chandradass J., Ganesan M., Rajan A. Scope of 3D printing in manufacturing industries – A review // Mater. Today: Proc. – 2021. – Vol. 45. – P. 6941–6945.
6. Borrello J., Nasser P., Iatridis J. C., Costa K. D. 3D printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial DLP-SLA printer // Addit. Manuf. – 2018. – Vol. 23. – P. 374–380.
7. Park S., Shou W., Makatura L., Matusik W., Fu K. 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications // Matter. – 2022. – Vol. 5. – P. 43–76.
8. Tang J.-F., Lin K.-W., Lin T.-H., Lin W.-C. Pioneering techniques for achieving high-resolution surfaces via LCD 3D printing // Addit. Manuf. – 2025. – Vol. 103. – Article 104764.
9. Sameni F., Ozkan B., Karmel S., Engstrøm D. S., Sabet E. Large scale vat-photopolymerization of investment casting master patterns // Polymers. – 2022. – Vol. 14(21). – Article 4593.
10. Formlabs Casting resins. URL: <https://formlabs.com/global/materials/?category%5B0%5D=casting> (дата звернення: 27.08.2025).
11. BlueCast X-One. URL: <https://www.bluecast.info/x-one> (дата звернення: 27.08.2025).