

УДК 621.74.045

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-29>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ: 3D-ДРУК ТА ЛИТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІДРОКОЛОЇДНИХ ТА СИЛІКОНОВИХ ГНУЧКИХ ПРЕС-ФОРМ

Сергієнко Ольга Сергіївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри машин і технології ливарного виробництва

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-5575-9856

Еластичні прес-форми, виготовлені з відбиткових альгінатних та силіконових складів, є ефективними та економічними альтернативами для технології швидкого прототипування за допомогою 3D-друку, особливо в умовах пріоритетності швидкості та доступності матеріалів. У роботі проаналізовано розмірну точність, вартість матеріалів, тривалість технологічного циклу та екологічність, визначено доцільність та сферу застосування гідроколоїдних і силіконових еластичних прес-форм для лиття за витоплюваними моделями для виконання завдань швидкого прототипування. Розглянуто властивості комерційно доступних стоматологічних матеріалів: альгінатних складів (CA37, Tropicalgin, Hydrogum5 та Hydrocolor5), конденсаційних та адитивних силіконів (Zhermack Elite HD та Optosil), а також технології 3D-друку за допомогою стереолітографії (SLA) та моделювання методом наплавлення (FDM). Установлено, що альгінатні матеріали придатні для умов прототипування невідповідальних виробів, вони забезпечують високу швидкість та скорочення витрат на обладнання та матеріали з мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище. Силіконові прес-форми забезпечують високу точність та економічну доцільність під час виготовлення невеликих партій прототипів. Порівняно з відбитковими матеріалами для еластичних прес-форм технології 3D-друку мають найвищу точність, однак потребують значних початкових інвестицій в обладнання та матеріали, а також великих витрат ресурсів, що підвищує негативний вплив на екологію. Основні результати дослідження висвітлюють переваги та обмеження альгінатних та силіконових матеріалів для виготовлення ливарних прес-форм, пропонуючи всебічний огляд їх застосування у сучасних технологічних процесах швидкого прототипування.

Ключові слова: гідроколоїд, альгінат, силікон, прес-форми, лиття, 3D-друк, швидке прототипування.

Serhiienko Olha. Comparative analysis of rapid prototyping methods: 3D printing and casting using hydrocolloid and silicone elastic molds

Elastic pattern molds manufactured from alginate and silicone impression materials present viable, cost-effective alternatives for 3D printing rapid prototyping technologies, particularly in scenarios prioritizing speed and material affordability. This article examines the dimensional accuracy, costs, time efficiency, and ecological properties, defining the feasibility and scope of use for hydrocolloid and silicone elastic molds in investment casting for rapid prototyping. The study researches the properties of commercially available dental materials: alginate compounds (CA37, Tropicalgin, Hydrogum5, and Hydrocolor5), condensation and additive silicones (Zhermack Elite HD and Optosil), as well as the 3D printing technologies of stereolithography (SLA) and fused deposition modeling (FDM). The research shows that alginate compounds present a viable option for prototyping non-critical components; they ensure high production speed and reduce equipment and materials expenses with minimal negative impact on the environment. Silicone pattern molds ensure high precision and cost-effectiveness of small-scale prototype batches. Compared to impression materials for elastic pattern molds, 3D printing technologies produce the highest level of precision, but they require significant initial equipment and materials investment, as well as a resource drain, which increases its negative environmental impact. Key findings highlight the advantages and limitations of alginate and silicone casting molds, offering a comprehensive perspective on their application in modern prototyping workflows.

Keywords: hydrocolloids, alginate, silicone, molds, casting, 3D printing, rapid prototyping.

Вступ. 3D-друк вважається золотим стандартом швидкого прототипування, але він потребує значних витрат на обладнання, обслуговування та витратні матеріали. Гідроколоїдні та силіконові відбиткові матеріали, які традиційно використовуються у стоматології, є доступними альтернативами [1]. Альгінатні та силіконові матеріали забезпечують розмірну точність, сумісність з іншими деталями,

довговічність і продуктивність під час застосування для швидкого прототипування. Гідроколоїди хоча й мають обмеження у досягненні мікрорівня деталей порівняно з 3D-друком за допомогою стереолітографії, пропонують достатню точність для невідповідальних виробів, таких як дослідницькі моделі, на початкових етапах прототипування. Силіконові форми поєднують точність та гнучкість, що робить їх

універсальним варіантом для виробів складної геометрії. Окрім стоматології, гідроколоїдні та силіконові форми знаходять застосування в археології, реставрації витворів мистецтва, прототипуванні споживчих товарів та у зворотному інжинірингу, де економічно ефективно та швидко виготовлення форм є важливим для початкових етапів проєктування [2–4].

Метою дослідження є оцінка можливостей застосування альгінатних і силіконових матеріалів для швидкого прототипування порівнянні з 3D-друком.

Методи та методика дослідження. У дослідженні аналізуються три технології для застосування у швидкому прототипуванні з використанням комерційно доступних продуктів, які широко застосовуються у стоматології та інших галузях:

1. Гідроколоїдні відбиткові матеріали: CA37, Tropicalgin, Hydrogum5, Hydrocolor5.
2. Конденсаційні та адитивні силікони для виготовлення гнучких форм: Zhermack Elite HD та Optosil.
3. Технології 3D-друку: стереолітографія (SLA) і моделювання методом наплавлення (FDM).

У дослідженні акцентовано увагу на п'яти параметрах процесу швидкого прототипування для порівняльного аналізу гідроколоїдних, силіконових форм та 3D-друку:

1. Розмірна точність визначалася за відхиленнями від еталонних моделей, а стабільність вимірювалася з часом за різних умов навколишнього середовища.
2. Точність відтворення поверхневих деталей оцінювали за допомогою методів 3D-сканування та мікроскопії, зосереджуючи увагу на відтворенні дрібних елементів.
3. Проведено детальний аналіз витрат, ураховуючи початкові витрати на матеріали, витрати на обладнання, потребу в обслуговуванні та потенціал повторного використання.
4. Аналізувався час підготовки, полімеризації та виробництва для оцінки тривалості технологічного процесу кожного методу.

5. Вивчався вплив кожного матеріалу на довкілля, у тому числі вплив сировини, виробничих процесів та енергоспоживання.

Для гідроколоїдних матеріалів відбитки виготовлялися за стандартними методами, використовуючи підложки, заповнені матеріалами CA37 і Hydrogum5. Матеріали залишали полімеризуватися згідно з умовами, рекомендованими виробником. Моделі виготовлялися негайно або після зазначених періодів зберігання. Для оцінки впливу навколишнього середовища зразки зберігалися за контрольованої вологості

50–90 % і перевірялися на усадку та спотворення через 12, 24 та 72 години.

Силіконові форми виготовлялися з використанням адитивних силіконів (Zhermack Elite HD) та конденсаційних силіконів (Optosil). Для оцінки точності форм використовували майстер-моделі зі складною геометрією. Повторне використання оцінювалося шляхом створення до 50 моделей із кожної форми з фіксацією розмірної точності та точності відтворення деталей. Також проводилися тести на стійкість до температур, піддаючи форми впливу від -10°C до 60°C .

3D-прототипи виготовлялися за допомогою SLS- та FDM-принтерів. Моделі включали стандартизовані вироби з різними рівнями складності. Фіксувалися роздільна здатність друку, параметри фінішної обробки та витрата матеріалів. Додаткові дослідження включали вплив різної товщини шару (25, 50 і 100 мікрон) на якість поверхні та розмірну точність.

Результати.

Розмірна точність і стабільність. Окремі гідроколоїдні прес-форми демонстрували розмірну стабільність із відхиленнями до 0,05 мм протягом 120 годин. Більшість альгінатних прес-форм мала відхилення більше 0,1 мм через 24 години. Гідроколоїдні прес-форми демонстрували значні відмінності в усадці. Наприклад, Hydrogum5 мав усадку менше 0,05 % за 120 годин порівняно з іншими альгінатними матеріалами, розміри яких зменшувалися приблизно на 0,2 % за годину після 24 годин. 3D-друковані прототипи демонстрували незначну усадку після полімеризації [5].

Силіконові форми показували кращу розмірну стабільність із відхиленнями до 0,02 мм для адитивних силіконів і до 0,05 мм для конденсаційних силіконів [3]. Адитивні силікони демонстрували незначну усадку навіть через сім днів, тоді як конденсаційні силікони показували незначні зміни через три дні [5].

Технології 3D-друку з високою роздільною здатністю, такі як SLA, досягали товщини шару до 25 мікрон (0,025 мм), забезпечуючи високу точність. Принтери FDM хоча й більш доступні, забезпечували товщину шару 50–200 мікрон, що впливало на точність [6–8]. Порівняльні характеристики альгінатних, силіконових і 3D-друкованих прототипів наведено в табл. 1.

Аналіз вартості. Силіконові форми забезпечували баланс між вартістю та довговічністю з початковими витратами на матеріали від 50 USD до 100 USD за форму, із можливістю багаторазового використання (до 50 моделей). Альгінатні матеріали хоча й дешевші (від 5 USD до

Таблиця 1

Порівняння розмірної точності та усадки

Матеріал	Стабільність, год.	Відхилення, мм	Усадка
CA37 (Cavex)	24	>0,1	~0,2 %/год
Tropicalgin	24	>0,1	~0,2 %/год
Hydrogum5	120	<0,05	<0,05 %/120 год
Hydrocolor5	120	<0,05	<0,05 %/120 год
Адитивний силікон	168	<0,02	Незначна
Конденсаційний силікон	72	<0,05	~0,2 %/тиждень
3D-друк (SLA)	–	<0,025	Відсутня
3D-друк (FDM)	–	<0,05–0,2	Відсутня

Таблиця 2

Порівняння вартості методів швидкого прототипування

Характеристика	Гідроколоїдні форми	Силіконові форми	3D-друк
Вартість матеріалу, USD	5–7	50–100	20–50
Вартість обладнання, USD	50	200	500–2000
Можливість повторного використання	Одноразове використання	До 50 циклів	Одноразове використання
Витрати на обслуговування, USD	10	50	200

7 USD за відбиток), проте обмежені одноразовим використанням. Витрати на матеріали для 3D-друку варіювалися від 20 USD до 50 USD за модель, що пов'язано зі значними початковими витратами на обладнання.

Загальна вартість виробництва суттєво залежала від розміру партії. Силіконові форми ставали економічно ефективними за збільшення розміру партії. Альгінатні прес-форми, навпаки, мали фіксовану вартість за одиницю через їх обмежене одноразове використання. 3D-друк забезпечував значну гнучкість для невеликих партій або одиничного виробництва, хоча й за вищої вартості за одиницю (табл. 2).

Тривалість технологічного циклу. Гідроколоїдні форми мали найкоротший технологічний цикл виготовлення із загальною тривалістю менше години. Силіконові форми потребували не менше 30 хвилин (часто – понад 24 годин) для полімеризації, але вони придатні для багаторазового застосування, що скорочувало тривалість технологічного циклу під час виготовлення партії моделей. 3D-друк хоча й має найдовшу тривалість технологічного циклу, забезпечував автономну роботу без нагляду оператора (табл. 3).

Екологічність. Екологічні властивості та стійкість матеріалів для прототипування

є критичними аспектами сучасного виробництва. Альгінатні відбиткові матеріали, отримані з водоростей, є поновлюваними і біорозкладними матеріалами. Їх видобуток і переробка мають відносно низький вплив на навколишнє середовище порівняно із синтетичними полімерами. Альгінатні матеріали досліджувалися для різних екологічних застосувань, включаючи біорозкладні плівки та композити для упаковки, підкреслюючи їхній потенціал у зменшенні залежності від звичайних пластмас [9].

Хоча силікон не є біорозкладним, його довговічність і стабільність можуть зменшити частоту заміни прес-форм, потенційно знижуючи загальний екологічний вплив. Однак виробництво силікону включає енергоємні процеси та використання невідновлюваних ресурсів.

Адитивне виробництво або 3D-друк пропонує як екологічні переваги, так і виклики. Процес пошарового формування зменшує кількість відходів порівняно з традиційними методами обробки. Однак енергоспоживання 3D-принтерів, особливо тих, що використовують лазери або високі температури, може бути значним. Використання перероблених матеріалів у 3D-друку визначено як стратегія підвищення стійкості шляхом зменшення відходів і попиту на первинні ресурси [10].

Таблиця 3

Тривалість технологічного циклу для різних методів швидкого прототипування

Технологічний етап	Гідроколоїдні форми	Силіконові форми	3D-друк
Підготовка	10 хв.	20–30 хв.	1–4 год.
Виготовлення	30 хв.	30 хв.	1–2 год.
Фінішні операції	–	–	1–2 год.

Висновки.

1. 3D-друк (SLA) забезпечує найвищу точність виготовлення моделей, за ним слідують силіконові прес-форми. Альгінатні прес-форми забезпечують помірну точність, придатну для швидкого прототипування невідповідальних деталей, або потребують доведення на фінішних операціях.

2. Альгінатні відбиткові матеріали є найбільш економічними для умов одноразового використання прес-форм за підтвердження концепції, зворотного інжинірингу і швидкого прототипування, тоді як силіконові прес-форми стають економічно доцільними за умови збільшення кількості використань. 3D-друк залишається дорожчим через вартість витратних матеріалів і обладнання.

3. Виготовлення гідроколоїдних прес-форм має найменшу тривалість технологічного процесу, але силіконові форми значно зменшують

час виробництва в умовах повторного використання. 3D-друк повільніший, але дає змогу автоматизувати роботу.

4. Альгінати є екологічними, біорозкладними та безпечними для навколишнього середовища матеріалами. Силіконові форми поєднують витривалість та помірну екологічність, тоді як 3D-друк потребує значних витрат енергії та ресурсів, що робить його найменш придатним для сталого виробництва.

Подальші дослідження варто сфокусувати на оптимізації гібридних технологічних процесів, які поєднували би переваги всіх трьох методів швидкого прототипування. Наприклад, використання силіконових форм для відтворення 3D-друкованих майстер-моделей дало б змогу скоротити витрати та поглибити можливості масштабування в умовах дрібносерійного виробництва.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wortmann F. J. Industrial-scale vacuum casting with silicone molds: A review. *Applied Research*. 2022. Vol. 1. № 1–2. DOI: 10.1002/appl.202100012
2. Maity C., Das N. Alginate-Based Smart Materials and Their Application: Recent Advances and Perspectives. *Topics Current Chemistry*. 2022. Vol. 380. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41061-021-00360-8>
3. Rahman M. M., Shahid M. A., Hossain M. T. et al. Sources, extractions, and applications of alginate: a review. *Discover Applied Sciences*. 2024. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06151-2>
4. Adamiak K., Sionkowska A. State of Innovation in Alginate-Based Materials. *Marine Drugs*. 2023. Vol. 21(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/md21060353>
5. Peutzfeldt A., Asmussen E. Accuracy of elastomeric impression materials. *European Journal of Oral Sciences*. 1989. № 97. P. 375–379.
6. Vitti R. P. Dimensional Accuracy of Stone Casts Made from Silicone-Based Impression Materials and Three Impression Techniques. *Brazilian Dental Journal*. 2013. № 24(5). P. 498–502. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6440201302334>
7. Dawood A., Marti B. 3D printing in dentistry: A review of precision. *British Dental Journal*. 2015. № 219. P. 521–529.
8. Martins F., Reis J. Cost-efficient, true silicone printer with variable material spectrum for individualized medical applications. *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 104. P. 435–439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.073>
9. Khan Z. I. Alginate-based sustainable films and composites for packaging: A review. *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 83. P. 271–276.
10. Su J. Achieving sustainability by additive manufacturing: a state-of-the-art review and perspectives. *Virtual and Physical Prototyping*. 2024. Vol. 19. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2438899>

REFERENCES:

1. Wortmann, F. J., et al. (2022). Industrial-scale vacuum casting with silicone molds: A review. *Applied Research*, 14, 3678. 10.1002/appl.202100012.
2. Maity, C., & Das, N. (2022) Alginate-Based Smart Materials and Their Application: Recent Advances and Perspectives. *Topics Current Chemistry*, 380. <https://doi.org/10.1007/s41061-021-00360-8>
3. Rahman, M. M. et al. (2024). Sources, extractions, and applications of alginate: a review. *Discover Applied Sciences*, 6. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06151-2>
4. Adamiak, K., & Sionkowska, A. (2023). State of Innovation in Alginate-Based Materials. *Marine Drugs*, 21(6), 353. <https://doi.org/10.3390/md21060353>
5. Peutzfeldt, A., & Asmussen, E. (1989). Accuracy of elastomeric impression materials. *European Journal of Oral Sciences*, 97, 375–379.

6. Vitti, R. P., & da Silva, M. A. (2013). Dimensional Accuracy of Stone Casts Made from Silicone-Based Impression Materials and Three Impression Techniques. *Brazilian Dental Journal*, 7, 4, 498–502. <https://doi.org/10.1590/0103-6440201302334>
7. Dawood, A., & Marti, B. (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, 219, 521–529.
8. Martins F., & Reis J. (2021). Cost-efficient, true silicone printer with variable material spectrum for individualized medical applications. *Procedia CIRP*, 104. 435–439. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.073>
9. Khan, Z. I., et al. (2021). Alginate-based sustainable films and composites for packaging: A review. *Chemical Engineering Transactions*, 83, 271–276.
10. Su, J. (2024). Achieving sustainability by additive manufacturing: a state-of-the-art review and perspectives. *Virtual and Physical Prototyping*, 19, 1. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2438899>