

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.8>

УДК 678.
678.679:1

СЛЕПЦОВ О. О., ІСКАНДАРОВ Р. Ш., СЛЕПЦОВ І. О., КОБЗА В. В.
Київський національний університет технологій та дизайну

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З ФОТОПОЛІМЕРУ

Мета. Дослідження впливу параметрів адитивного виробництва та тривалості постобробки на властивості готових виробів на основі акрилових полімерів.

Методика. Визначали основні фізико-механічні властивості дослідних зразків – міцність та відносне видовження при розриві за ISO 527-2:2012, ударну в'язкість за ISO 179-1:2010, твердість за шкалою Шор Д за ISO 2039-1:2001, модуль пружності при згині за ISO 178:2010, а також густину за ISO 1183-1:2019 в рідкому та твердому станах.

Результати. Досліджено вплив параметрів адитивного виробництва методом стереолітографії для фотополімерних олігомерів. Показано вплив параметрів адитивного виробництва та постобробки на механічні властивості. Оцінено властивості зразків, одержаних адитивним виробництвом в порівнянні зі зразками, отвердженими у формі. Виявлено, що здійснення додаткового експонування в УФ випромінюванні може збільшити міцність при розриві в 2–3 рази в залежності від тривалості обробки. Здійснення постобробки є необхідною умовою для забезпечення рівня механічних властивостей, придатного для утворення функціональних виробів. Збільшення тривалості засвічування у камері 3D принтеру приводить до зростання міцності при розриві в 2 рази, але знижує загальну швидкість процесу адитивного виробництва. Ударна міцність готових виробів збільшується зі збільшенням тривалості засвічування шару та суттєво зростає при збільшенні тривалості постобробки.

Наукова новизна. Досліджено особливості зміни механічних властивостей фотополімеру в залежності від умов адитивного виробництва дослідних зразків. В залежності від застосовуваних параметрів адитивного виробництва можна отримувати вироби, що володіють функціональними властивостями. Параметри постобробки визначають комплекс механічних властивостей готового виробу.

Практична значимість. Відпрацьовано технологічні режими адитивного виробництва виробів на основі фотополімерної смоли. Встановлено раціональні параметри 3D друку акрилового фотополімеру.

Ключові слова: адитивне виробництво; лазерна стереолітографія; фотополімер; 3D принтер; УФ випромінювання.

Вступ. Адитивне виробництво – узагальнена назва технологій, які передбачають виготовлення виробу за даними тривимірної цифрової моделі методом пошарового додавання матеріалів [1]. Існують різні технології адитивного виробництва в залежності від використовуваного принципу роботи та матеріалів – лазерна стереолітографія (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), метод наплавлення (FDM) [2–3].

В технології методом наплавлення як витратний матеріал використовується мононитка певного діаметру, яка безперервно подається в екструдер 3D принтеру, розплавляється і пошарово насичується на платформу принтеру. Кожен наступний шар видавлюється на попередній за заданою траєкторією, за рахунок чого і відбувається побудова виробу. Для більш плавної подачі матеріалу, а також швидкого затвердіння шарів, екструдери оснащуються зовнішніми вентиляторами, що створюють різкий перепад температур. Дана технологія не дозволяє створювати малогабаритні вироби зі складним деталюванням [4].

Селективне лазерне спікання передбачає використання як витратного матеріалу порошкоподібного матеріалу – полімеру, металу. Дана технологія має переважно промислове значення і відрізняється високою вартістю витратних матеріалів та обладнання [5].

Хоча про 3D принтери стали активно говорити лише останніми роками, історія розвитку тривимірного друку налічує близько 30 років: перше застосування було зафіксовано в 1980-х

роках. Родоначальником адитивних технологій вважається американець Чарльз Халл, який у 1986 р. запатентував спосіб стереолітографії, заснував компанію 3D Systems і розробив перший 3D принтер Stereolithography Apparatus. Термін «стереолітографія» був визначений Чарльзом Халлом в патенті від 1984 р. як «система генерування тривимірних об'єктів за рахунок пошарового формування». Удосконаливши в 1988 р. колишню модель, компанія почала перше серійне виробництво 3D принтерів SLA-250 [6].

Стереолітографія — технологію 3D друку, яка використовується для виробництва моделей, прототипів, зразків і деталей продукції шар за шаром, шляхом затвердіння fotocутливого матеріалу, який піддається дії УФ лазера, або іншого подібного джерела енергії [7]. Для побудови кожного шару лазер проходить по поперечному перерізу деталі на поверхні фотополімеру – рідкої смоли. При дії світла ультрафіолетового лазера смола твердішає відповідно будуючи шар моделі заданої форми і з'єднується з попереднім шаром, який знаходиться знизу. Після того як шар був побудований, рухома платформа спускається на відстань, яка дорівнює товщині одного шару, яка зазвичай складає 0,05 мм до 0,15 мм. На цій новій поверхні рідини, друкується наступний шар зразка, беручи початок з попереднього шару. В результаті такого процесу формується повна 3D модель [8]. Після цього, отриману деталь занурюють в хімічну ванну, щоб очистити від надлишку смоли і згодом проводять процес кінцевого затвердіння в ультрафіолетовій камері.

Фотополімер – рідкий олігомер, здатний отверджуватися під дією УФ випромінювання певної довжини хвилі. Як правило, фотополімер містить у своєму складі три основні компоненти – ініціатор, розчинник та полімерну смолу на акриловій основі, що надає йому специфічного різкого запаху при використанні [9].

Дана технологія переважає інші за своєю можливістю швидко створювати різноманітні вироби з ідеально гладкою поверхнею та високою деталізацією. Слабкою стороною стереолітографії є проблема забезпечення високих фізико-механічних властивостей готових виробів за рахунок раціонального підбору технологічних параметрів адитивного виробництва та постобробки сформованих виробів [10].

Основні технологічні параметри даної технології, що впливають на кінцеві експлуатаційні властивості готового виробу, це – тривалість засвічування шару та тривалість постобробки виробу.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу параметрів адитивного виробництва та тривалості постобробки на властивості готових виробів на основі акрилових полімерів.

Результати дослідження. Для досліджень було використано фотополімер марки Anycubic призначений для створення тривимірних об'єктів на 3д принтері за технологією LCD/DLP з довжиною хвилі до 405 нм. Адитивне виробництво дослідних зразків здійснювали на 3д принтері марки Anycubic Photon LCD. Для оцінки отриманих результатів вимірювань використовували як базу для порівняння зразки фотополімеру, отверджені у формі після вільного заливання (табл. 1).

Таблиця 1

Властивості базового зразка

№ п/п	Властивості	Значення
1	Міцність при розриві, МПа	34,5
2	Відносне видовження, при розриві, %	6,3
3	Ударна в'язкість, кДж/м ²	25,4
4	Твердість за Шор Д, од	96
5	Модуль пружності при згині, МПа	2156
6	Густина, кг/м ³	1196

Для постобробки дослідних зразків використовували камеру з УФ лампою потужністю 40 Вт, довжина хвилі 405 нм, відстань від джерела випромінювання до зразка – 10 см.

Основні технологічні параметри адитивного виробництва – тривалість засвічування одного шару варіювалась від 5 до 60с. Товщина шару складала 50мкм.

Визначали основні фізико-механічні властивості дослідних зразків - міцність та відносне видовження при розриві (ISO 527-2:2012), ударну в'язкість (ISO 179-1:2010), твердість за шкалою Шор Д (ISO 2039-1:2001), модуль пружності при згині (ISO 178:2010), а також густину (ISO 1183-1:2019) в рідкому та твердому станах. Результати досліджень представлені в табл. 2.

Густина фотополімеру у рідкому стані становить 690 кг/м^3 - визначена пікнометричним методом при 20°C

Таблиця 2

Властивості дослідних зразків

№ п/п	Властивості	Значення						
		Тривалість засвічування шару, с	Тривалість постобробки, хв					
			0	15	30	45	60	120
1	Міцність при розриві, МПа	10	7,61	19,5	20,2	27,7	28,3	27,8
		20	11,2	23,8	23,5	27,8	27,4	30,1
		30	13,5	24,5	25,6	27,5	27,9	29,5
		40	15,6	24,7	23,6	27,8	29,6	30,5
2	Відносне видовження, при розриві, %	10	8,0	8,5	3,8	8,6	8,2	6,3
		20	8,2	8,6	6,2	7,7	8,3	7,0
		30	8,5	8,3	6,5	7,4	7,4	8,2
		40	8,1	8,6	5,5	7,8	7,7	5,7
3	Ударна в'язкість, кДж/м^2	10	8,4	10,5	16,1	22,7	17,6	18,6
4	Твердість за Шор Д, од	10	88	90	92	93	94	95
5	Модуль пружності при згині, МПа	10	1240	1350	1480	1680	1760	1920
6	Густина, кг/м^3	10	1190,9	1194,5	1192,5	1197,6	1198,0	1199,0

Збільшення тривалості засвічування шару до 40с приводить до зростання міцності при розриві дослідних зразків практично в 2 рази. Тривалість постобробки суттєво впливає на значення міцності при розриві. Так постобробка зразка сформованого з тривалістю засвічування шару 10с на протязі 30 хв дозволяє в 3 рази підвищити його міцність при розриві, а постобробка 60 хв – в 4 рази підвищує міцність. Такі зміни пов'язані з проходженням реакцій додаткової радикальної полімеризації в процесі постобробки. При зростанні тривалості засвічування шару виробу, тривалість постобробки має менш відчутний вплив на зміну міцності – всього в 2 рази, що зумовлено меншою інтенсивністю проходження реакції полімеризації в процесі постобробки через попереднє утворення сітчастої структури в процесі адитивного виробництва. Збільшення тривалості постобробки до 120 хв практично не впливає на зміну міцності зразків через відсутність вільних реакційноздатних молекул.

Відносне видовження в незначній мірі змінюється при зміні тривалості засвічування шару та тривалості постобробки.

Ударна в'язкість дослідних зразків зростає практично в 2 рази при збільшенні тривалості постобробки до 60 хв. Також зростає твердість зразків та модуль пружності при згині, що вказує на підвищення жорсткості виробів зі зростанням тривалості постобробки.

Таким чином, властивості готових виробів при адитивному виробництві можна регулювати шляхом зміни тривалості засвічування шару та тривалості постобробки.

Густина фотополімеру після дії УФ випромінювання зростає з 690 кг/м^3 до $1190,9 \text{ кг/м}^3$ в наслідок підвищення щільності упаковки макромолекул. В процесі постобробки значення густини зразка незначно зростає через додаткове проходження реакцій структурування. Зміна густини вказує на значення об'ємного усадження фотополімеру - чим більша зміна густини спостерігається, тим вище усадження фотополімеру, що варто враховувати на стадії 3д моделювання майбутнього виробу.

Порівнюючи властивості матеріалу, отвердженого під час адитивного виробництва та отвердженого у формі, слід зазначити, що більш високе значення міцності при розриві та модулю пружності спостерігається при отвердженні в формі. Дане спостереження можливо пов'язане з розкладом фотоініціатору під час першої стадії адитивного виробництва, коли фотополімер частково отверджується у 3Д принтері випромінюванням малої потужності. Подальша обробка в камері зумовлює додаткове отвердження смоли, але частина фотоініціатору вже вступила в реакцію. При отвердженні в формі, фотоініціатор опромінюється випромінюванням більш високої потужності, ніж в принтері, що зумовлює одержання більшого ступеня зшивання.

Властивості досліджених зразків фотополімеру при здійсненні коректної постобробки наближаються або перевершують відповідні значення для промислових термопластів, таких як полістирол удароміцний та полістирол загального призначення [11]. Така особливість є важливим критерієм для застосування адитивних технологій виробництва для отримання функціональних деталей.

Вдосконалення рецептурного складу фотополімеру шляхом введення ударомодифікуючих добавок та використання суміші полімерних смол є перспективним кроком для подальших досліджень в даному напрямку.

Висновки. Досліджено зміну фізико-механічних характеристик при зміні параметрів друку та умов постобробки виробів з фотополімеру надрукованих на 3д принтері за технологією LCD з довжиною хвилі до 405 нм. Збільшення тривалості засвічування шару з 10 с до 40 с зумовлює зростання міцності при розриві зразків в 2 рази в наслідок збільшення числа утворених поперечних зв'язків в структурі фотополімеру. Постобробка після адитивного виробництва має ключовий вплив на фізико-механічні властивості виробу. Так після 60 хв постобробки зразки володіють в 4 рази вищим значенням міцності при розриві, ударна в'язкість зростає практично в 2 рази, що узгоджується зі збільшення модулю пружності при згині в 1,4 рази.

Таким чином, раціональними технологічними параметрами адитивного виробництва виробів на основі акрилового фотополімеру є тривалість засвічування шару 10с та наступна постобробка виробу 60 хв.

References

1. Wohlers, T. (2014). Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report, Wohlers Associates. 276 p.
2. 3D Printer Market Sales Will Exceed \$14.6 billion in 2019. URL: <http://blogs.gartner.com/pete-basiliere/2015/09/29/3d-printer-market-sales-will-exceed-14-6-billion-in-2019/>.
3. 3D Printing and Intellectual Property Law: Key Considerations. April, 2015. URL: <http://www.qlegal.qmulac.uk/docs/157017.pdf>.

Література

1. Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report, Wohlers Associates, 2014. 276 p.
2. 3D Printer Market Sales Will Exceed \$14.6 billion in 2019. URL: <http://blogs.gartner.com/pete-basiliere/2015/09/29/3d-printer-market-sales-will-exceed-14-6-billion-in-2019/>.
3. 3D Printing and Intellectual Property Law: Key Considerations. April, 2015. URL: <http://www.qlegal.qmulac.uk/docs/157017.pdf>.

4. Dai, Lu; Hong, Xiao. The Development of 3D Print Technology. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 644–650. 4856–4859.
5. Stereolithography. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>.
6. About Anycubic. URL: <https://www.anycubic.com/pages/about-anycubic>.
7. Sahana, V. W., Thampi, G. T. (2018). 3D printing technology in industry. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. DOI: 10.1109/ICISC.2018.8399128.
8. Xue Liang Ma. Research on Application of SLA Technology in the 3D Printing Technology. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 401–403: 938–941. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.938.
9. ISO 17296-2:2015. Additive manufacturing – general principles – Part 2: Overview of process categories and feedstock. Geneva: International Organization for Standardization; 2015.
10. Savaliya, J. A., Parikh, H. N., Sidapara, A. P., Gosai, K. G. (2021). 3D Printing Technology: A Future Perspective. *International Journal of Engineering Research in Electronics and Communication Engineering (IJERECE)*. Vol. 8. P. 12–17.
11. MatWeb, LLC. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dada63b21acb40a2bf53aaa1a40475fc&ckck=1>.

4. Dai Lu, Hong Xiao. The Development of 3D Print Technology. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 644–650. 4856–4859.
5. Stereolithography. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>.
6. About Anycubic. URL: <https://www.anycubic.com/pages/about-anycubic>.
7. Sahana V. W., Thampi G. T. 3D printing technology in industry. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. 2018. DOI: 10.1109/ICISC.2018.8399128.
8. Xue Liang Ma. Research on Application of SLA Technology in the 3D Printing Technology. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 401–403: 938–941. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.938.
9. ISO 17296-2:2015. Additive manufacturing – general principles – Part 2: Overview of process categories and feedstock. Geneva: International Organization for Standardization; 2015.
10. Savaliya J. A., Parikh H. N., Sidapara A. P., Gosai K. G. 3D Printing Technology: A Future Perspective. *International Journal of Engineering Research in Electronics and Communication Engineering (IJERECE)*. 2021. Vol. 8. P. 12–17.
11. MatWeb, LLC. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dada63b21acb40a2bf53aaa1a40475fc&ckck=1>.

SLIEPTSOV ALEKSANDR

PhD, Assistant, Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
Сконус 57189215952
E-mail: slyepcov.oo@knu-d.edu.ua

SLIEPTSOV IGOR

Student, Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: slyepcov.oo@knu-d.edu.ua

ISKANDAROV RUSLAN

Department of Applied Ecology, Technology
of Polymers and Chemical Fibers,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2164-0061>
E-mail: iskandarov.r.sh@gmail.com

KOBZA VYACHESLAV

Student, Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: slyepcov.oo@knu-d.edu.ua

СЛЕПЦОВ А. А., ИСКАНДАРОВ Р. Ш., СЛЕПЦОВ И. А., КОБЗА В. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
НА СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕРА**

Цель. Исследование влияния параметров аддитивного производства и продолжительности постобработки на свойства готовых изделий на основе акриловых полимеров.

Методика. Определяли основные физико-механические свойства опытных образцов - прочность и относительное удлинение при разрыве по ISO 527-2:2012, ударную вязкость по ISO 179-1:2010, твердость по шкале Шор Д по ISO 2039-1:2001, модуль упругости при изгибе по ISO 178:2010, а также плотность по ISO 1183-1:2019 в жидком и твердом состояниях.

Результаты. Исследовано влияние параметров аддитивного производства методом стереолитографии для фотополимерных олигомеров. Показано влияние параметров аддитивного производства и постобработки на механические свойства. Оценены свойства образцов, полученных аддитивным производством по сравнению с образцами, отвержденными в форме. Выявлено, что осуществление дополнительного экспонирования в УФ излучении может увеличить прочность при разрыве в 2-3 раза в зависимости от длительности обработки. Осуществление постобработки является необходимым условием обеспечения уровня механических свойств, пригодного для образования функциональных изделий. Увеличение продолжительности засветки в камере 3D принтера приводит к росту прочности при разрыве в 2 раза, но снижает общую скорость процесса аддитивного производства. Ударная прочность готовых изделий увеличивается при увеличении продолжительности засветки слоя и существенно возрастает при увеличении продолжительности постобработки.

Научная новизна. Исследованы особенности изменения механических свойств фотополимера в зависимости от условий аддитивного производства опытных образцов. В зависимости от применяемых параметров аддитивного производства можно получать изделия, обладающие функциональными свойствами. Параметры постобработки определяют комплекс механических свойств готового изделия.

Практическая значимость. Отработаны технологические режимы производства изделий на основе фотополимерной смолы. Установлены оптимальные параметры 3D печати акрилового фотополимера.

Ключевые слова: аддитивное производство; лазерная стереолитография; фотополимер; 3D принтер; УФ-излучение.

SLIEPTSOV A. A., ISKANDAROV R. Sh., SLIEPTSOV I. A., KOBZA V. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**INFLUENCE OF ADDITIVE MANUFACTURING FORMING PARAMETERS
ON COMPLEX PROPERTIES OF THE ARTICLES MADE
FROM PHOTSENSITIVE RESIN**

Purpose. Study of the influence of additive manufacturing parameters and post forming operations on complex mechanical properties of the articles formed from UV curable acrylic oligomer.

Methodology. Determination of physical and mechanical properties of standard samples which was formed by additive manufacturing technics from UV curable polymer. Tensile strength and relative elongation at brake according to ISO 527-2:2012, impact strength according to: ISO 179-1:2010. Durometer hardness according to: ISO 2039-1:2001. Bending modulus according to: ISO 178:2010. Density according to: ISO 1183-1:2019

Findings. Additive manufacturing parameters for stereolithography process was studied for liquid UV curable acrylic oligomer. Study was focused on influence of forming settings and post forming treatment of complex mechanical properties of final articles which was shaped as standard testing samples. Properties of additive manufactured samples was compared with the properties of samples which was cured by UV light in bulk inside shaped cavity with the same geometrical dimensions. Correct post forming treatment results in up to 2 – 3 times increase in tensile strength. Post forming treatment is necessary for achieving functional level of mechanical properties, comparable to the properties of typical industrial polymers. Study of influence of

UV light exposure during additive manufacturing shows double fold increase in tensile strength but reduce overall forming speed. Impact strength increase with increasing exposure time and significantly increase with duration of post forming treatment. Post treatment operations with correct parameters can result in forming articles with level of properties sufficient for functional applications.

Originality. Study was focused on mechanical properties of UV curable polymer in dependence from forming parameters of additive manufacturing process and post treatment operations. Application of correct post forming setting can lead to material properties with valuable for functional applications.

Practical value Optimal parameters for additive manufacturing process based on UV curable resin and LCD exposure technology was investigated. Forming and post forming parameters significantly influence complex mechanical properties of formed articles.

Keywords: additive manufacturing; UV curable resin; Stereolithography; 3D printing.