

Д. О. ДМИТРИЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

М. Ф. КУЗМІЧОВ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-1501-6865

ВПЛИВ ПОСТОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

У статті проведено аналітичний огляд сучасних методів обробки поверхонь різноманітних матеріалів отриманих 3D-друком. Розглянуто окремо вплив механічної, абразивної, лазерної і хімічної видів пост обробки деталей в адитивному виробництві на вплив мікрогеометрії поверхонь, залишкових напружень, точності розмірів. Наведено класифікацію дефектів друку в технології Fused Deposition Modeling (FDM) та селективного лазерного спікання SLM для металів і сплавів у сучасному адитивному виробництві, проаналізовано останні дослідження у цій сфері.

Встановлено впливові технологічні фактори такі як потужність лазера, швидкість сканування, час обробки, виконано порівняння методів лазерного і електрохімічного полірування. По сучасних джерелах науково технічної інформації визначено вплив режимно-технологічних параметрів пост обробки на забезпечення шорсткості поверхонь в адитивному виробництві. Зокрема, магнітореологічного методу оздоблення поверхонь після наплавлення, механічному різанні після FDM друку в залежності від кута орієнтації сопла головки друку до деталі у відношенні до кінцевої шорсткості поверхні за критерієм середнього арифметичного параметру Ra. Розглянуто процес зниження параметру шорсткості після лазерного полірування в двофакторній залежності від потужності та величини подачі лазера при пост обробці металевих деталей. Виконано порівняння середовищ для методів хімічного і електрохімічного оздоблення, вплив їх складу, концентрації, температури, часу контактування щодо мікрорельєфу поверхні заготовки, що підтверджується даними сучасних наукових досліджень. Розроблено початкову класифікацію комбінованих методів як перспективного напрямку в пост обробці адитивних технологій з визначенням їх технологічних чинників і режимних умов, обґрунтовано переваги та недоліки. Зроблено узагальнюючий аналіз технологічних параметрів пост обробки в адитивних технологіях їх доцільності для полімерних і окремо металевих матеріалів, сформульовано технічні рекомендації керування якістю поверхонь методами пост обробки.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, температурно-технологічні умови, якість виробів.

D. O. DMYTRIIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

M. F. KUZMICHOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0003-1501-6865

INFLUENCE OF POST-MAKING ON THE QUALITY OF PARTS IN ADDITIVE MANUFACTURING

The article provides an analytical review of modern methods of surface treatment of various materials obtained by 3D printing. The influence of mechanical, abrasive, laser and chemical types of post-processing of parts in additive manufacturing on the influence of surface microgeometry, residual stresses, and dimensional accuracy is considered separately. The classification of printing defects in Fused Deposition Modeling (FDM) technology and selective laser sintering SLM for metals and alloys in modern additive manufacturing is presented, and the latest research in this area is analyzed.

Influential technological factors such as laser power, scanning speed, and processing time are established, and a comparison of laser and electrochemical polishing methods is made. According to modern sources of scientific and technical information, the influence of post-processing regime and technological parameters on ensuring surface

roughness in additive manufacturing is determined. In particular, the magnetorheological method of surface finishing after surfacing, mechanical cutting after FDM printing depending on the orientation angle of the print head nozzle to the part in relation to the final surface roughness according to the criterion of the arithmetic mean parameter R_a . The process of reducing the roughness parameter after laser polishing in a two-factor dependence on the power and laser feed rate during post-processing of metal parts is considered. A comparison of media for chemical and electrochemical finishing methods, the influence of their composition, concentration, temperature, and contact time on the microrelief of the workpiece surface is made, which is confirmed by the data of modern scientific research. An initial classification of combined methods as a promising direction in post-processing of additive technologies is developed with the definition of their technological factors and operating conditions, the advantages and disadvantages are substantiated. A general analysis of the technological parameters of post-processing in additive technologies and their feasibility for polymeric and separately metallic materials is made, and technical recommendations for surface quality control by post-processing methods are formulated.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, temperature-technological conditions, product quality.

Постановка проблеми

Новітні технології адитивного виробництва, такі як 3D-друк мають інтенсивне застосування в промисловості у різних галузях, включаючи медицину, авіацію та автомобілебудування. Вважається, що основною перевагою таких методів є можливість швидкого створення складних геометричних форм із помірно мінімальними виробничими ресурсами. Однак на практиці, характеристики виготовлених деталей, такі як механічна міцність, точність розмірів або шорсткість поверхні, часто не відповідають очікуванням, що пов'язано з недостатнім вивченням фізичних явищ та технологічних умов адитивних технологій. В сучасних умовах недостатня увага до цього етапу призводить до виникнення дефектів, що ускладнює використання деталей у високотехнологічних сферах. Тому виникає важлива потреба комплексного дослідження впливу різних методів постобробки на кінцеві властивості продукції для підвищення якості деталей і розширення можливостей їх практичного застосування [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Адитивне виробництво різними матеріалами потребує усунення дефектів отриманих під час виготовлення до яких відносять «ефект сходів», великі агломерати сферичних розплавів (рис. 1) і ін.

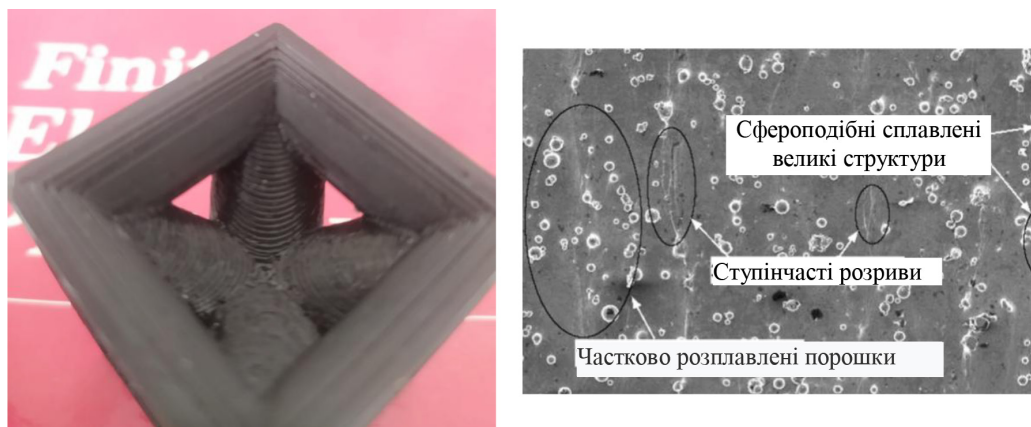


Рис. 1. Приклади в адитивних технологіях: а) – зовнішні дефекти типу «сходів»; внутрішні утворення після селективного лазерного плавлення металевих порошків

Аналізуючи сучасні дослідження [1, 5, 6, 10], можна виділити кілька основних аспектів впливу постобробки. Механічна обробка (шліфування, фрезерування), покращує точність розмірів, але може вплинути на внутрішню структуру матеріалу. Термічна обробка використовується для зниження залишкових напружень, покращення механічних властивостей, але може спричинити зміну розмірів. Хімічна обробка як травлення або полірування підвищує якість поверхні, однак іноді негативно впливає на структурну цілісність. Фізичні методи такі як лазерна обробка, ультразвукове полірування забезпечують високу якість поверхні без значного впливу на розміри. Багато дослідників наголошують на необхідності комбінованих методів обробки для досягнення оптимальних результатів.

Метою цього дослідження є систематизація знань про вплив різних методів постобробки на якість деталей, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. Основний акцент зроблено на вивченні таких аспектів: покращення поверхневих характеристик деталей, зменшення залишкових напружень у матеріалах, забезпечення довговічності та стабільності деталей при експлуатації, комбіновані методи для оптимізації процесів постобробки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Постобробка є невід'ємною складовою адитивного виробництва, яка значно впливає на якість готових деталей. Основні методи постобробки мають свої специфічні характеристики та впливають на різні аспекти продукції. Механічна обробка застосовується для покращення геометричної точності деталей та видалення залишків матеріалу. Найпоширенішими техніками є шліфування, фрезерування та полірування. Однак, надмірний механічний вплив може створювати мікротріщини, що впливають на довговічність матеріалу. Термічна обробка використовується для зняття залишкових напружень та покращення структурної цілісності деталей. Метод дозволяє уникати деформацій і забезпечувати стабільність форми. Термічні методи також допомагають підвищити ударну в'язкість та міцність матеріалів, особливо металевих сплавів. Хімічна обробка полягає у застосуванні розчинів для зниження шорсткості поверхні та підвищення її гладкості. Хімічне травлення використовується для полімерних деталей і забезпечує естетичний вигляд та функціональність. Водночас, довготривала дія хімічних реагентів може негативно впливати на механічні властивості матеріалу. Лазерна обробка спрямована на точкову обробку поверхонь для досягнення мінімальної шорсткості. Забезпечує високу точність і відсутність негативного впливу на основну структуру деталей. Особливо ефективна для металевих деталей, які потребують високого рівня фінішної обробки. Комбіновані методи – поєднання кількох технік, таких як термічна та лазерна обробка, дозволяє отримувати оптимальні характеристики продукції.

Сучасним методом абразивної постобробки та оздоблення поверхонь полімерних деталей є абразивно-струменева обробка [2]. Використовують два типи абразивів, такі як оксид алюмінію і скляні шарики. В роботі [3] досліджували розмір зерен, орієнтацію поверхні та тиск як вони впливають на шорсткість поверхні (рис. 2).

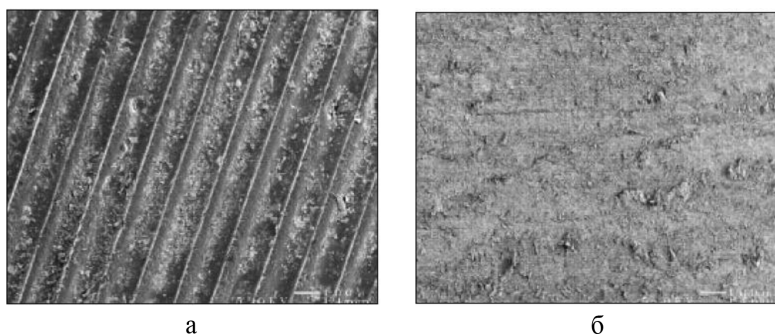


Рис. 2. Вигляд поверхонь деталей отриманих методом стереолітографії після абразивно-струменевої обробки [3]

В багатьох роботах досліджувались параметри тиску струменю абразиву, відстані і часу струменевої обробки але відзначалося відсутність гнучкості при такому виді оздоблення для деталей складних форм. Як альтернативу розроблено абразивні методи з зануренням надрукованої деталі в абразивне середовище для фінішної обробки. Таким є фінішна обробка в контейнері з деталлю в середині барабану, що обертається (рис. 3, а). В порівнянні з цим в наукових публікаціях зазначається, що ефективним є оздоблення поверхонь серед групи процесів механічної абразивної обробки є магнітореологічна обробка (рис. 3, б) [4].

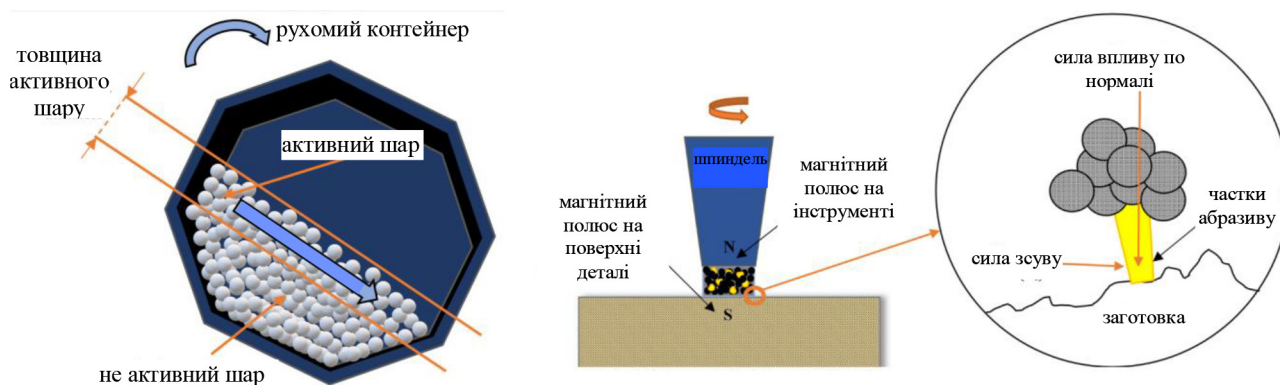


Рис. 3. Метод пост обробки в вільному абразивному середовищі (а),
схема процесу магніто-реологічного оздоблення (б)

Постобробці різанням нагрітим різакон полімерних деталей присвячено роботу авторів [5]. В даному дослідженні на основі параметричних залежностей розроблено алгоритм розрахунку глибини різання в залежності кута профілю друкованої деталі з їх впливом на отриману шорсткість поверхні (рис. 4).

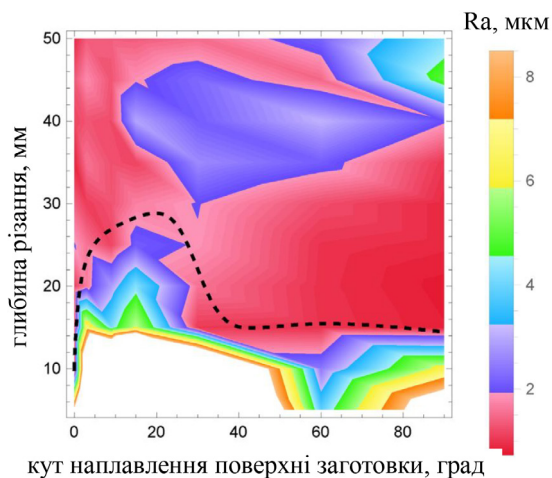


Рис. 4. Шорсткість поверхні як функція кута наплавлення і глибини різання [5]

Лінія пунктиром, що проходить крізь зону параметру глибини різання, забезпечує найменшу шорсткість. При тестовій обробці надрукованої деталі параметр R_a в випадкових зонах поверхні знизився з 50,61, 25,42 і 16,53 мкм до 1,91, 1,66 і 1,52 мкм, відповідно.

Стосовно лазерної пост обробки друкованих деталей існує не багато напрацювань через низьку температуру плавлення полімерів. В цілому лазерне полірування застосовують для металевих деталей отриманих шляхом селективного лазерного плавлення або спікання порошків на столі для друку [5]. Так лазерне полірування вивчалось в роботі [6] для деталей виготовлених методом FDM. Було встановлено, що шорсткість поверхні не залежить від щільності енергії лазера і при мінімальній щільності енергії (потужність 0,75 Вт і швидкість подачі 180 мм/с) параметр шорсткості R_a майже не змінився. На відміну від полімерних матеріалів лазерне оздоблення металевих виробів отриманих шляхом селективного лазерного плавлення або спікання порошків в доповнення до ефекту «сходів» додається велика агломерація порошків. На рис. 5 показано експериментально отриману залежність шорсткості металевих виробів в залежності від потужності лазера та подачі [7].

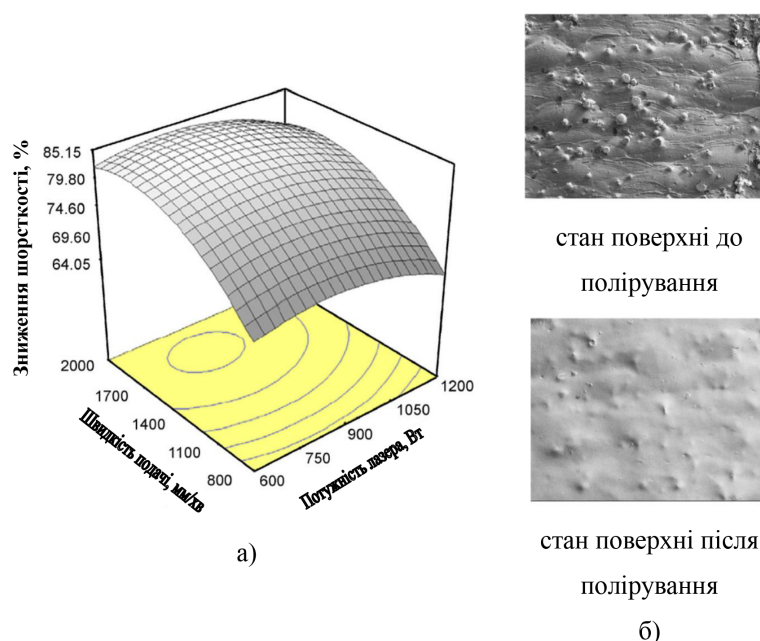


Рис. 5. Приклади впливу параметрів лазерного (а) та електрохімічного (б) полірування на шорсткість поверхні металевих деталей отриманих адитивними технологіями [11]

В дослідженнях [8, 9, 10] вивчалось полірування лазером друкованих сталевих деталей та встановлено, що збільшення потужності лазера з 1 до 3 Вт з одночасним зменшенням швидкості сканування з 5 до 1 мм/с значно покращує шорсткість поверхні. Кількість сканувань від 1 до 4 призводить до зменшення шорсткості поверхні та гомогенізації при тому, що подальше сканування призводить до утримання тріщин, що є негативним ефектом лазерного полірування за рахунок збільшення твердості з 281 HV до 509–558 HV. В поверхневих шарах спостерігаються залишкові напруження розтягу на рівні 926 МПа, а мікротвердість на поверхні збільшується на 25 %.

Поширеним способом постобробки деталей отриманих адитивними технологіями є електрохімічне та хімічне оздоблення [11]. Науково підтвердженими даними про ефективність промислового застосування є використання розчину сірчаної кислоти з етанолом в якості електрохімічного середовища (рис. 5, б).

В результаті аналізу сучасних методів постобробки адитивних технологій сформульовано їх первинні характеристики (табл. 1).

Таблиця 1

Узагальнення переваг і недоліків кожного методу постобробки

Метод постобробки	Переваги	Недоліки
Механічна обробка	Покращення точності розмірів; видалення залишків матеріалу	Можливе виникнення мікротріщин
Термічна обробка	Зниження залишкових напружень; покращення механічних характеристик	Мінімальні спотворення розмірів
Хімічна обробка	Досягнення високої гладкості поверхні	Зниження міцності на розтягнення при тривалій обробці
Лазерна обробка	Максимальна гладкість поверхні; усунення дефектів	Висока вартість обладнання
Комбіновані методи	Оптимальні характеристики за всіма параметрами	Складність реалізації; потреба в додаткових ресурсах

Висновки

В результаті дослідження встановлено переваги і недоліки методів постобробки деталей отриманих адитивними технологіями в залежності від матеріалу та властивостей процесу друку. Розглянуто основні технологічні параметри постобробки механічними, лазерними, хімічними, електрохімічними, термічними і комбінованими методами, зокрема їх вплив за критеріями якості готових виробів таких як точність геометричних форм та розмірів готових виробів, шорсткість обробленої поверхні, мікротвердість поверхневого шару, рівень залишкових напружень. Параметричні залежності та властивості матеріалів, що отримано в результаті аналітичного огляду існуючого науково-технічного досвіду постобробки в адитивних технологіях можуть бути використані для удосконалення окремих технологічних процесів машинобудівного виробництва.

Список використаної літератури

1. Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J., & Prashanth, K. G. (2020). Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys. *Materials*, 13(20), 4564. <https://doi.org/10.3390/ma13204564>
2. Leong, K. F., Chua, C. K., Chua, G. S., & Tan, C. H. (1998). Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA). *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 36–47. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00041-7)
3. Williams, R. E., & Melton, V. L. (1998). Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes. *Rapid Prototyping Journal*, 4, 56–67. <https://doi.org/10.1108/13552549810207279>
4. Kumar, A., Alam, Z., Khan, D. A., & Jha, S. (2019). Nanofinishing of FDM fabricated components using ball end magnetorheological finishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, 34, 232–242. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512136>
5. Boschetto, A., Bottini, L., & Veniali, F. (2016). Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.004>
6. Dewey, M. P., & Ulutan, D. (2017). Development of laser polishing as an auxiliary post-process to improve surface quality in fused deposition modeling parts. *Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Los Angeles, CA, USA, 4–8 June 2017. American Society of Mechanical Engineers, 50732, V002T01A006.
7. Lamikiz, A., Sánchez, J., de Lacalle, L. L., & Arana, J. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 2040–2050. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.013>
8. Zhou, J., Liao, C., Shen, H., & Ding, X. (2019). Surface and property characterization of laser polished Ti6Al4V. *Surface & Coatings Technology*, 380, 125016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125016>
9. Cernašević, O., Škamat, J., Marković, V., Višniakov, N., & Indrišić, S. (2019). Surface laser processing of additive manufactured 1.2709 steel parts: Preliminary study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 7029471. <https://doi.org/10.1155/2019/7029471>

10. Temmler, A., Liu, D., Preußner, J., Oeser, S., Luo, J., Poprawe, R., & Schleifenbaum, J. (2020). Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. *Materials & Design*, 192, 108689. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108689>
11. Baicheng, Z., Xiaohua, L., Jiaming, B., Junfeng, G., Pan, W., Chen-Nan, S., Muiling, N., Guojun, Q., & Jun, W. (2017). Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing. *Materials & Design*, 116, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.103>

References

1. Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J., & Prashanth, K. G. (2020). Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys. *Materials*, 13(20), 4564. <https://doi.org/10.3390/ma13204564>
2. Leong, K. F., Chua, C. K., Chua, G. S., & Tan, C. H. (1998). Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA). *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 36–47. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00041-7)
3. Williams, R. E., & Melton, V. L. (1998). Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes. *Rapid Prototyping Journal*, 4, 56–67. <https://doi.org/10.1108/13552549810207279>
4. Kumar, A., Alam, Z., Khan, D. A., & Jha, S. (2019). Nanofinishing of FDM fabricated components using ball end magnetorheological finishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, 34, 232–242. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512136>
5. Boschetto, A., Bottini, L., & Veniali, F. (2016). Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.004>
6. Dewey, M. P., & Ulutan, D. (2017). Development of laser polishing as an auxiliary post-process to improve surface quality in fused deposition modeling parts. *Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Los Angeles, CA, USA, 4–8 June 2017. American Society of Mechanical Engineers, 50732, V002T01A006.
7. Lamikiz, A., Sánchez, J., de Lacalle, L. L., & Arana, J. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 2040–2050. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.013>
8. Zhou, J., Liao, C., Shen, H., & Ding, X. (2019). Surface and property characterization of laser polished Ti6Al4V. *Surface & Coatings Technology*, 380, 125016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125016>
9. Cernašević, O., Škamat, J., Marković, V., Višniakov, N., & Indrišić, S. (2019). Surface laser processing of additive manufactured 1.2709 steel parts: Preliminary study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 7029471. <https://doi.org/10.1155/2019/7029471>
10. Temmler, A., Liu, D., Preußner, J., Oeser, S., Luo, J., Poprawe, R., & Schleifenbaum, J. (2020). Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. *Materials & Design*, 192, 108689. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108689>
11. Baicheng, Z., Xiaohua, L., Jiaming, B., Junfeng, G., Pan, W., Chen-Nan, S., Muiling, N., Guojun, Q., & Jun, W. (2017). Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing. *Materials & Design*, 116, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.103>