

16. Khomchenko V.S., Roshchina N.N., Zav'ialova L.V., Strel'chuk V.V., Svechnikov G.S., Tat'ianenko N.P., Gromashevskii V.L., Litvin O.S., Avramenko E.A., Snopok B.A. Issledovanie struktury, emissionnykh i p'ezoelektricheskikh svoistv plenok ZnS, ZnS-ZnO i ZnO, poluchennykh khimicheskim metodom [Study of the structure, emission and piezoelectric properties of ZnS, ZnS-ZnO and ZnO films obtained by the chemical method]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 2014, vol. 84, iss. 1, pp. 94-103. (Rus.)

Рецензент: В.П. Гранкін
д-р фіз.-мат. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 25.03.2019

УДК 621.81:004.94

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181282

© Рябікіна М.А.*

3D ПРИНТУВАННЯ МЕТАЛАМИ: СТИСЛИЙ SWOT АНАЛІЗ

В статті розглядаються технології, що застосовуються для 3D друку, їх переваги і недоліки. Результати літературних досліджень засновані на динамічному розвитку адитивних технологій і включають наукові публікації не старші п'яти років. Огляд представлений у вигляді короткого SWOT аналізу: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (сильні, слабкі сторони, можливості, загрози). Формулювання проблеми включає в себе введення в тему і містить розвиток і актуальність технологій 3D друку металами. Надані теоретичні засади і визначені терміни «Адитивне виробництво», «3D друк». В роботі представлені основні принципи, сутність та сфери застосування селективного лазерного спікання (SLS), прямого металевого лазерного спікання (DMLS), селективного лазерного плавлення (SLM). Розглянуто основні види металевих матеріалів. В статті також окреслені сучасні проблеми і ризики 3D друку, можливості і прогнози. Однією з основних проблем є пористість деталей. Вона може бути викликана самим технологічним процесом або металевим порошком, використаним в процесі 3D друку. Пори зменшують загальну щільність деталі і можуть призвести до появи тріщин і втоми. У висновку підкреслюється, що конкретні характеристики деталей і широкий спектр застосувань технологій 3D друку безумовно змінять цілі галузі промисловості в доступному для огляду майбутньому. Для компаній та країн особливо важливо передбачити і адаптуватися до поточного розвитку 3D друку, щоб не втратити свої позиції на ринку.

Ключові слова: адитивні технології, 3D друк, лазер, спікання, плавлення.

Рябікіна М.А. 3D принтирование металлами: краткий SWOT анализ. Обзор технологий 3D печати металлами выполнен в виде краткого SWOT анализа: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (сильные, слабые стороны, возможности, риски). Результаты литературных исследований основаны на динамичном развитии аддитивных технологий и научных публикациях не старше пяти лет. В статье определены термины «Аддитивное производство», «3D печать», обсуждены основные принципы и сферы применения селективного лазерного спекания (SLS), прямого металлического лазерного спекания (DMLS), селективного лазерного плавления (SLM). Рассмотрены основные виды металлических материалов, очерчены проблемы 3D печати, тенденции и прогнозы. Одной из основных проблем является пористость деталей. Она может быть

* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, maryna.ryabikina@gmail.com

вызвана как технологическим процессом, так и используемым при печати металлическим порошком. Микropopы уменьшают общую плотность изделия и могут привести к появлению трещин и усталости. В заключении подчеркивается, что приемлемый комплекс свойств деталей и широкий спектр применения технологий 3D печати, безусловно, изменят целые отрасли промышленности в обозримом будущем. Для компаний и стран особенно важно предусмотреть и адаптироваться к тенденциям развития 3D печати, чтобы не потерять свои позиции на рынке.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D печать, лазер, спекание, плавление.

M.A. Ryabikina. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. The aim of this article is to analyze 3D-printing from various viewpoints and to determine its advantages and disadvantages. Therefore comprehensive information dealing with it has been thoroughly studied. The results were compiled in a brief SWOT – analysis (strengths, weaknesses, opportunities and threats); they are based on the dynamic development of 3D-printing technologies, the literature analysis includes the papers that were published not more than five years ago. The formulation of the problem includes an introduction and contains the development and relevance of metal 3D-printing technologies. The main material contains the theoretical foundations, where the terms «Additive Manufacturing», «3D-printing» are defined. Moreover, the basic principles and the proceedings order are presented. Thereby, the selective laser sintering (SLS), direct metal laser sintering (DMLS), and the selective laser melting (SLM) as a selection of different manufacturing techniques have been described and discussed. The work briefly represents the main metal materials and includes a comprehensive analysis. The possibilities, problems and risks of 3D-printing technology are presented. One of the main problems is porosity. It can result from the 3D-printing process itself or even from the powder used in the process. These microscopic holes reduce the overall density of the part and can result in cracks and fatigue. Besides, a forecast for the development of 3D-printing is described. The conclusion summing up the most important results declares that the specific characteristics of the parts and the wide range of applications of 3D-printing technology are to change whole industries in the foreseeable future. For companies as well as for countries it is particularly important to foreknow it and to manage to adapt themselves for the current development of 3D-printing in order to avoid losing their market position.

Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, laser, sintering, melting.

Постановка проблеми. В даний час адитивні технології широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як аерокосмічна, автомобільна, виробництво споживчих товарів, медична сфера. Адитивне виробництво пропонує важливий ряд переваг порівняно з традиційними способами виготовлення, який полягає у можливості створення різних деталей з високою складністю форми, скороченням часом виготовлення, тощо. Механічні властивості деталей прийнятні, вони залежать від складу та розміру металевих порошкових зерен, внутрішньої структури деталей, параметрів технологічного процесу та технології виготовлення. Вказані фактори також мають важливий вплив на шорсткість поверхні та точність виготовлених деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На відміну від традиційних технологій виготовлення деталей, коли відходи можуть досягати до 70%, адитивні технології майже безвідходні і передбачають побудову деталі послідовним додаванням шарів матеріалу. Адитивні технології є активно обговорюваною темою, проте промисловий 3D друк до теперішнього часу не отримав розповсюдження на вітчизняних підприємствах. Мають місце очевидні проблеми, з якими стикаються власники 3D принтерів.

В даний час адитивним технологіям присвячена переважно англomовна література та інтернет-джерела [1-5]. Щодо інформації українською мовою, її зовсім недостатньо. Аналіз публікацій показує, що питанням технологій 3D друку на металі, матеріалам та властивостям кінцевих виробів не приділено належної уваги.

Мета статті – аналіз сучасних технологій металевого друку, їх переваг і недоліків, матеріалів, галузей застосування.

Виклад основного матеріалу. Для технологій об'ємного друку рекомендовані два основних терміни – Additive Manufacturing (AM), Additive Fabrication (AF), а також рівнозначні за змістом – Additive Processes, Additive Techniques, Additive Layer Manufacturing, Freeform Fabrication. Всі вони можуть бути перекладені як «адитивні технології». Суть адитивного виробництва – в додаванні, а не відніманні, в такому способі створення деталі складної форми, коли матеріал наноситься послідовно, як правило, шар за шаром, тому витрачається його стільки, скільки необхідно. Процесом керує комп'ютер, в чий пам'яті закладена тривимірна модель майбутньої деталі, нарізана на тонкі шари-перетини. Пристрій, що подає матеріал (екструдер), рухається по заданим комп'ютером траєкторіях, шар за шаром конструюючи майбутній виріб. Передбачається, що готова деталь не потребує традиційної механічної обробки. Так що адитивне виробництво – це ще один спосіб виготовлення деталей і предметів з різних матеріалів поряд з литтям, прокаткою, штампуванням і різкою, рисунок 1.

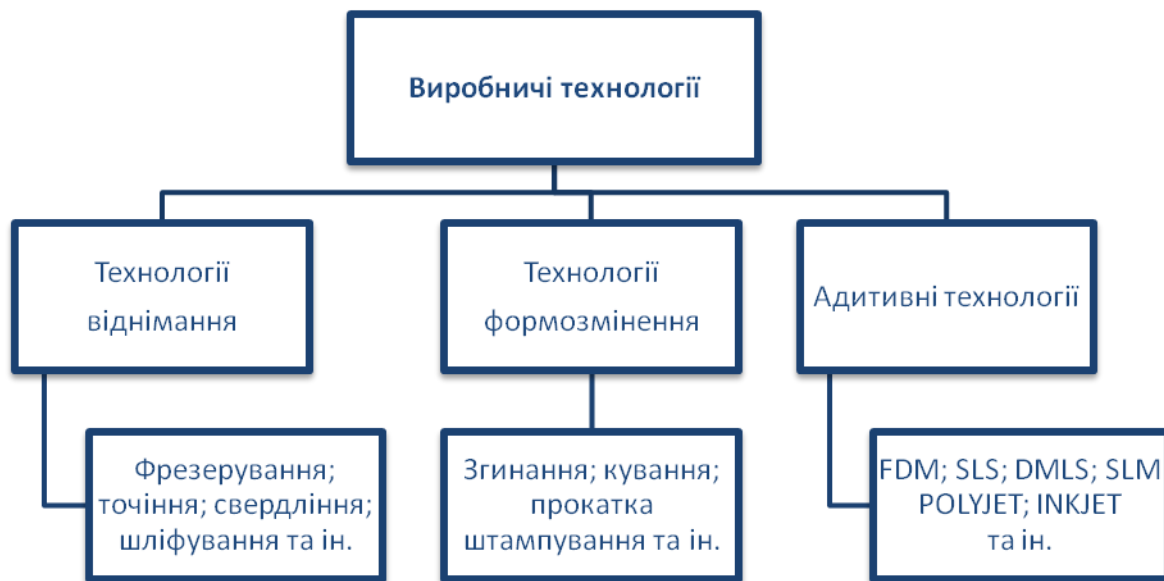


Рис. 1 – Класифікація виробничих технологій

Конкурентна перевага адитивних технологій полягає в наступному:

– створення складних за формою конструкцій, які були б неможливі без пошарового виробництва;

– швидкість;

– оптимізація топології і зниження ваги деталі;

– економічна ефективність.

Адитивне виробництво фактично розвивалося з 1980-х років, спочатку з'явилися лазерні технології як для металів, так і для полімерів. Але першим винахідником вважається Отто Джон Мюнц, який розробив установку в 1951 році. Поршень в циліндрі зміщувався на невелику відстань і звільняв простір для шару, який заповнювали світлочутливим полімером. Потім полімер опромінювали світлом так, що він застигав тільки на певній ділянці. Наступний рух поршня – ще один шар, ще один цикл затвердіння... В результаті з багатьох шарів виходила об'ємна полімерна модель. Це був ключовий принцип, який ліг в основу сучасної стереолітографії (SL). Серед основних розробників цих технологій – MIT і Техаський університет (SLS; Binder Jetting), 3D Systems (SLA), а також SLM Solutions (SLM) і EOS GmbH, які зіграли важливу роль в розробці 3D друку металами. У 1999 році з'явився Arcam з власно розробленою технологією металевого 3D друку під назвою Electron. Уже в 1990-х адитивні технології з використанням нагріву лазерним і електронним променем для отримання металевих об'єктів стали частиною світового виробничого ландшафту. Термін «3D Printing» завдячує креативності студентів Масачусетського технологічного інституту, які в 1995 році запропонували цей зрозумілий модний вислів.

В середині 2000-х років General Electric приєднався до цього курсу і почав цікавитися 3D печаткою металу. Врешті-решт технологія металевого 3D друку була застосована компанією для виготовлення сопла авіаційного двигуна.

Коли мова йде про 3D друк металами, існує декілька провідних технологій. Вони відрізняються матеріалами і методами виготовлення деталей. Розглянемо виробничий процес, переваги та області використання деяких з них.

Американський бізнесмен, винахідник і викладач на ім'я доктор Карл Декард розробив і запатентував технологію SLS (Selective Laser Sintering) в середині 1980-х. Це техніка 3D друку, яка використовує лазери з високою потужністю CO₂. Перед початком друку в комп'ютер завантажуються тривимірні моделі в STL-файлі. Потім цифрову 3D модель «розрізають» на тонкі шари, товщина яких відповідає товщині шарів, що наносяться друкарським пристроєм. В робочу камеру подається тонкий шар порошку в кількості, необхідній для першого шару (~100 мкм). Матеріал у вигляді порошку наноситься на рухому робочу платформу, яка переміщується по осі Z, рисунок 2. Спеціальний валик розрівнює поданий порошок і видаляє зайвий матеріал з камери, після чого лазер (потужність 25-100 Вт, тривалість імпульсу 0,5-25 мс) спікає частки порошку між собою і з попереднім шаром при температурі близько 1600°C згідно контурам за заданою цифровою моделлю. Потім процес повторюється: валик подає свіжий порошок і лазер спікає наступний шар. В технології DMLS немає необхідності побудови опор для елементів конструкції. Невикористаний порошок не видаляється під час друку, а залишається в робочій камері, створюючи для кожного нового шару опорну поверхню. Крім того, невитрачений матеріал може бути зібраний з робочої камери після завершення друку і використаний заново. SLS виробництво можна вважати фактично безвідходним, що важливо при використанні дорогих матеріалів, наприклад, дорогоцінних металів.

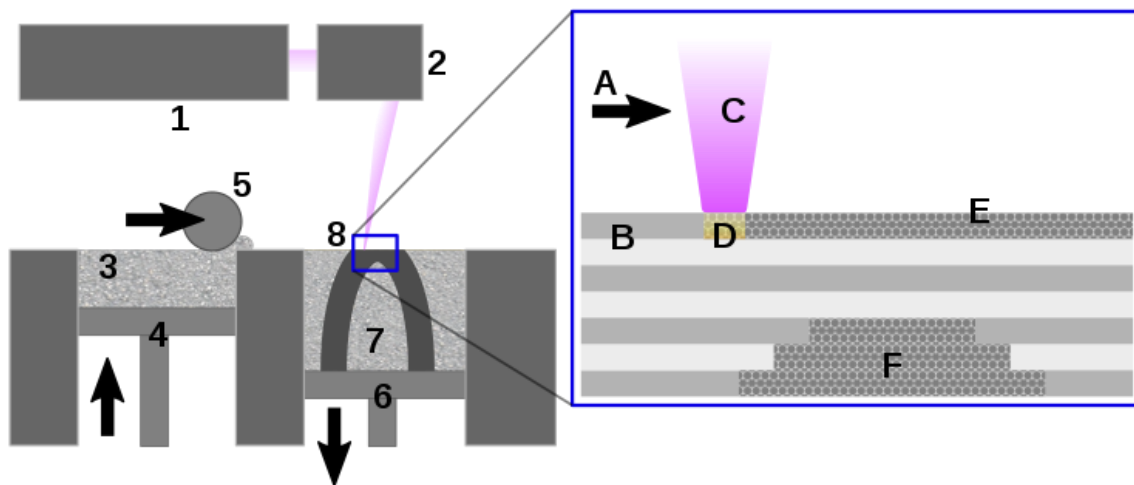


Рис. 2 – Схема SLS технології: 1 – лазерна система; 2 – сканер; 3 – система подачі порошку; 4 – поршень для подачі порошку; 5 – ролик; 6 – габаритний поршень; 7 – виготовлення порошкового шару; 8 – процес виготовлення об'єкту (див. збільшене зображення); А – напрям лазерного сканування; В – спечені частинки порошку («коричневий стан»); С – лазерний промінь; D – лазерне спікання; E – неспечений порошковий шар («зелений стан»); F – неспечений матеріал у попередніх шарах. Зелений та коричневий стани відображають «стиглість» готової деталі: зелений – «незрілий» (неспечений порошок), коричневий – «стиглий» (майже готовий виріб)

SLS виробляє довговічні деталі з високою точністю і може використовувати широкий спектр матеріалів. Це досконала технологія для повнофункціональних деталей та прототипів кінцевого використання. SLS досить схожий на технологію SLA за швидкістю та якістю. Основна відмінність полягає в матеріалах, оскільки у SLS використовуються порошкоподібні речовини, тоді як SLA використовують рідкі смоли. Саме широке розмаїття доступних матеріалів робить технологію SLA такою популярною для друку на замовлені об'єкти.

Науковці з Німеччини розробили дві схожі технології:

1) DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – пряме металеве лазерне спікання, запропоновано компанією EOS;

2) SLM (Selective Laser Melting) – Селективне лазерне спікання, компанія SLM Solutions.

Компанія SLM дебютувала в 1995 році. Вона була частиною німецького дослідницького проекту в Інституті Фраунгофера ILT, розташованому в місті Аахен. Як і SLA, SLM також використовує потужний лазерний промінь для формування 3D деталей. Під час процесу друку лазерний промінь плавить та сплавляє різні металеві порошки разом. Найпростіший спосіб поглянути на це – розбити основний процес таким чином:

Порошкоподібний матеріал + тепло + точність + шарувата структура = ідеальний 3D об'єкт.

Коли лазерний промінь потрапляє в тонкий шар матеріалу, він вибірково з'єднує, або зварює частинки разом. Після повного циклу друку принтер додає новий шар живлення матеріалу до попереднього. Потім об'єкт зміщується на точну кількість товщини одного шару. Коли процес друку завершено, невикористаний порошок видаляється з об'єкта. Основна відмінність SLM від SLS полягає в тому, що SLM повністю плавить порошок, тоді як SLS спікає його. Взагалі кінцеві продукти за технологією SLM, як правило, міцніші, оскільки в них менше порожнин, або їх зовсім немає. Пористість – один із суттєвих недоліків 3D виробів [6-8]. Мікроскопічні отвори знижують загальну щільність деталі і можуть призвести до тріщин і втомного руйнування. Пористість може бути викликана самим процесом 3D друку, або навіть порошком, що використовується. Під час процесу розпилення порошку всередині порошкової сировини можуть утворюватися газові «кишені», які потім будуть перенесені на кінцевий виріб. Частіше пори можуть виникати всередині частини через сам процес 3D друку. Якщо потужність лазера є недостатньою, металеві частинки можуть не плавитись належним чином. Навпаки, коли використовується надмірно велика кількість енергії, виникає явище, при якому розплавлений метал вилітає з басейну розплаву в сусідні ділянки. Пористість може бути знижена (відповідно, щільність деталі підвищена) за допомогою методики «острівного сканування» лазером, а при селективному лазерному плавленні (SLM) для зменшення викиду бризок можна змінювати форму лазера [9]. В окремих випадках друкований виріб потребує додаткової термічної обробки для зняття внутрішніх напруг, при виготовленні масштабних деталей виникає проблема короблення.

В SLM- технології побудова шару включає наступні операції:

- металевий порошок наноситься на плиту побудови, яка закріплена на платформі;
- лазерний промінь сканує перетин шару виробу;
- платформа опускається в колодязь побудови на глибину, що збігається з товщиною шару.

Побудування виконується в камері SLM-машини, яка заповнена інертним газом (аргоном або азотом). Основний обсяг газу витрачається на початковому етапі, коли шляхом продувки з камери побудови видаляється все повітря. По завершенні процесу побудови деталь разом з плитою виймають з камери порошкового 3D принтера, відділяють від плити, видаляють підтримки і виконують фінальну обробку виробу, рис. 3.

SLM технологія має серйозні перспективи для підвищення ефективності виробництва в багатьох галузях промисловості, оскільки [10, 11]:

- забезпечує високу точність і повторюваність;
- механічні характеристики виробів, надрукованих на цьому типі 3D принтера, можна порівняти з такими після лиття;
- вирішує складні технологічні завдання, пов'язані з виготовленням геометрично складних виробів;
- дозволяє зменшити масу за рахунок побудови об'єктів з внутрішніми порожнинами;
- економить матеріал при виробництві.

Для металевого DMLS/SLM прінтування використовуються наступні матеріали:

- Сплав алюмінію AlSi7Mg0,6: алюміній (90%), кремній (7%) і магній (0,6%);
- Нержавіюча сталь 316L: залізо (66-70%), хром (16-18%), нікель (11-14%), молібден (2-3%);
- Сплав титану 6Al-4V: титан (88-90%), алюміній (5,5-6,5%), ванадій (3,5-4,5%).

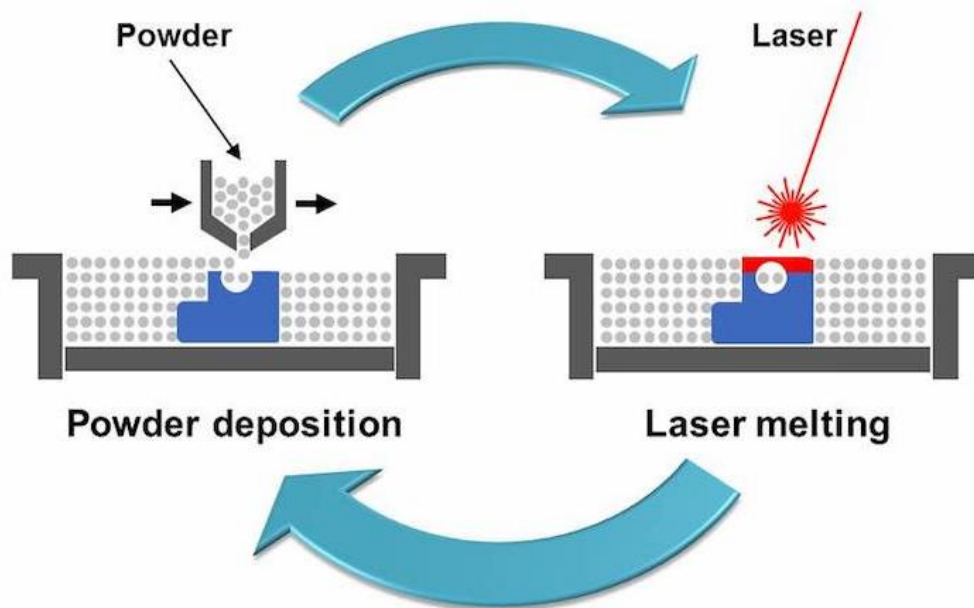


Рис. 3 – Схема побудування виробу в установках SLM Solutions

Аерокосмічна та космічна галузі є одними з перших бенефіціарів АМ технологій (до 20%). Запчастини SLM використовуються для інструментального обладнання, деталей двигуна, таких як ротори та крильчатки, канали охолодження тощо. Автомобільна промисловість потребує 16% виробів, створених за АМ технологіями.

Одна із сильних сторін адитивного виробництва – штучне виготовлення виробу будь-якої форми. Сьогодні виготовлені та успішно випробувані серцеві клапани, штучні щелепи, частини колінного суглоба, імплантати черепа, тканини і органи з клітин людини. Два провідних виробника слухових апаратів, Siemens і Phonak, застосовують адитивні технології для виготовлення індивідуальних пристроїв, точно відповідних до вуха пацієнта. Так що медицина – велике поле для адитивного виробництва, на частку медицини, стоматології та фармакології припадає 12% АМ виробів.

За даними Wohlers Associates [12] прогнози на 2020 рік становлять 15,8 мільярда доларів для всіх продуктів та послуг АМ в усьому світі.

Висновки

Підводячи підсумок, можна відзначити, що в роботі розглянуті технології 3D друку металами, матеріали, їх переваги та недоліки. Специфічні характеристики виробів і широкий спектр застосувань дозволяють впевнено сказати, що адитивні технології неодмінно змінять цілі виробництва в різних галузях в досяжному майбутньому. Для компаній, а також країн особливо важливо передбачити та адаптуватись до поточної розробки технологій 3D принтування, щоб уникнути втрати їх ринкового становища.

Перелік використаних джерел:

1. Metal 3D Printing Materials using Direct Metal Laser Sintering (DMLS) technology [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.sculpteo.com. – Назва з екрана.
2. Systems and Solutions for Metal Additive Manufacturing [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.eos.info. – Назва з екрана.
3. 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.engineering.com/3DPrinting. – Назва з екрана.
4. All3DP World's #1 3D Printing Magazine STL – File Format for 3D Printing – Simply Explained [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing. – Назва з екрана.

5. Что такое данные САПР (CAD) [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/data/cad/what-is-cad-data.htm. – Назва з екрана.
6. Buchanan C. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges / C. Buchanan, L. Gardner // *Engineering Structures*. – 2019. – Vol. 180. – Pp. 332-338. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.engstruct.2018.11.045](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045).
7. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM) / Chenchen Tian [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 743. – Pp. 697-706. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.msea.2018.11.138](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.138).
8. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences / Galy Cassiopée [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 22. – Pp. 165-175. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.addma.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.005).
9. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts / Koutiri Imade [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – Vol. 255. – Pp. 536-546. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2017.12.043](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.043).
10. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel / E. Liverani [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 249. – Pp. 255-263. – Mode of access: DOI: [10.1016/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042](https://doi.org/10.1016/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042).
11. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities / A. M. T. Syed [et al.] // *Materials today*. – 2017. – Vol. 1. – Pp. 1-16. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.mattod.2017.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001).
12. Wohlers Report 2019 [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.wohlersassociates.com/2019report.htm. – Назва з екрана.

References:

1. Metal 3D Printing Materials using Direct Metal Laser Sintering (DMLS) technology Available at: www.sculpteo.com (accessed 15 January 2019).
2. Systems and Solutions for Metal Additive Manufacturing Available at: www.eos.info (accessed 05 December 2018).
3. 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing Available at: www.engineering.com/3DPrinting (accessed 18 January 2019).
4. All3DP World's #1 3D Printing Magazine STL – File Format for 3D Printing – Simply Explained Available at: www.all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing (accessed 01 February 2019).
5. What is it CAD data Available at: www.pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/data/cad/what-is-cad-data.htm (accessed 20 January 2019).
6. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 2019, vol. 180, pp. 332-338. doi: [10.1016/j.engstruct.2018.11.045](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045).
7. Chenchen Tian, Xuekun Li, Hanyang Li, Guoqiang Guo, Liping Wang, Yiming Rong. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM). *Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 743, pp. 697-706. doi: [10.1016/j.msea.2018.11.138](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.138).
8. Galy Cassiopée, Le Guen Emilie, Lacoste Eric, Arvieu Corinne. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 22, pp. 165-175. doi: [10.1016/j.addma.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.005).
9. Koutiri Imade, Pessard Etienne, Peyre Patrice, Amlou Ouafae, De Terris Thibaut. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, Vol. 255, pp. 536-546. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.12.043](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.043).
10. Liverani E., Toschi S., Ceschini L., Fortunato A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 249, pp. 255-263. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042).

11. Syed A.M.T., Elias P.K., Amit B., Susmita B., Lisa O., Charitidis C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 2017, Vol. 1, pp. 1-16. doi: **10.1016/j.mattod.2017.07.001**.
12. Wohlers Report 2019 Available at: www.wohlersassociates.com/2019_report.htm (accessed 08 February 2019).

Рецензент: В.Г. Єфременко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.02.2019