

О НЕОБХОДИМОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

ANNOTATION:

The article discusses additive manufacturing based on polymer extrusion. In the modern industrial revolution, which follows the concept of Industry 4.0, additive manufacturing plays a fundamental role as an enabling technology that allows the creation of objects with almost any geometry. Based on this, existing standards for polymer-based materials are general in nature, and there are no open standards developed for polymer-based materials.

Key words: polymer, extrusion, additive manufacturing, standards.

АҢДАТПА:

Мақалада полимерлі экструзияға негізделген аддитивті өндіріс қарастырылады. Индустрия 4.0 тұжырымдамасын ұстанатын заманауи өнеркәсіптік революцияда аддитивті өндіріс кез келген дерлік геометриядағы объектілерді жасауға мүмкіндік беретін технология ретінде негізгі рөл атқарады. Осыған сүйене отырып, полимер негізіндегі материалдарға арналған қолданыстағы стандарттар жалпы сипатта болады, ал полимер негізіндегі материалдар үшін әзірленген ашық стандарттар жоқ.

Түйінді сөздер: полимер, экструзия, аддитивті өндіріс, стандарт.

АННОТАЦИЯ:

В статье рассмотрено аддитивное производство на основе экструзии полимеров. В современной промышленной революции, которая следует концепции Индустрия 4.0, аддитивное производство играет фундаментальную роль в качестве вспомогательной технологии, позволяющей создавать объекты практически с любой геометрией. Исходя из этого существующие стандарты для материалов на основе полимеров носят обобщенный характер, а также нет открытых стандартов, разработанных для материалов на основе полимеров.

Ключевые слова: полимер, экструзия, аддитивное производство, стандарт.

Аддитивное производство (АП) или 3D-печать на основе экструзии полимеров - процесс, в котором послойно создаются объекты из 3D-модели с помощью полимерного материала в виде нити или гранул и 3D-принтера, оснащенного экструдером. В 3D-принтерах можно использовать переработанные полимерные материалы.

Наиболее часто используемым полимером для 3D-печати является полилактид (PLA). Это биоразлагаемый термопластичный полиэфир, полученный из натуральных источников (в основном крахмала и сахара). Однако, его деградация в нормальных природных условиях происходит медленно, что может привести к накоплению полилактидного мусора в окружающей среде. Одним из способов утилизации отходов PLA является компостирование. Но этот метод обычно используют для разложения промышленных отходов, где мусор собирается в больших количествах каждый день, чего нет в случае с PLA на сегодняшний день. Переработка отходов для использования в АП является интересной задачей, потому что позволит сэкономить затраты, поскольку PLA является дорогим полимером, а строительство установок по компостированию требует больших инвестиций. Кроме того, анализ нормативной базы

в области полимерного АП показывает, что организации ISO и ASTM разработали только семь стандартов на полимеры в области АП, не указывая тип полимера.

В последние годы модернизация и замена продукции происходят все более быстрыми темпами. Новые продукты с расширенными функциями и/или более инновационным дизайном вытесняют существующие на рынке продукты. Возросшая конкуренция за то, чтобы производимая продукция выходила на мировой рынок раньше конкурентов, привела к тому, что компаниям пришлось запускать свои новые продукты в кратчайшие сроки. Традиционные производственные технологии, как правило, предполагают длительное время изготовления, связаны с потерями материала из-за сложного характера процессов и требуют большого мастерства, например, литье и механическая обработка. Для того чтобы удовлетворить спрос в рамках этого ускоренного процесса изменения продукта, необходимо разработать новые технологии, сократить время, затрачиваемое на этапы проектирования, производства, тестирования и вывода товара на рынок [1].



Технологии аддитивного производства (АП), также называемые 3D-печатью или быстрым прототипированием, относятся к числу передовых технологий в Индустрии 4.0. АП - это технология производства изделий по 3D-модели путем послойного добавления материала [2]. Применение этой технологии широко распространено, и

благодаря ее простоте в использовании, широкое промышленное применение делает ее перспективной для производства. В основном АП применяется в аэрокосмической отрасли, медицине, авиации и автоматизации, пример представлен на рисунке 1 [3].

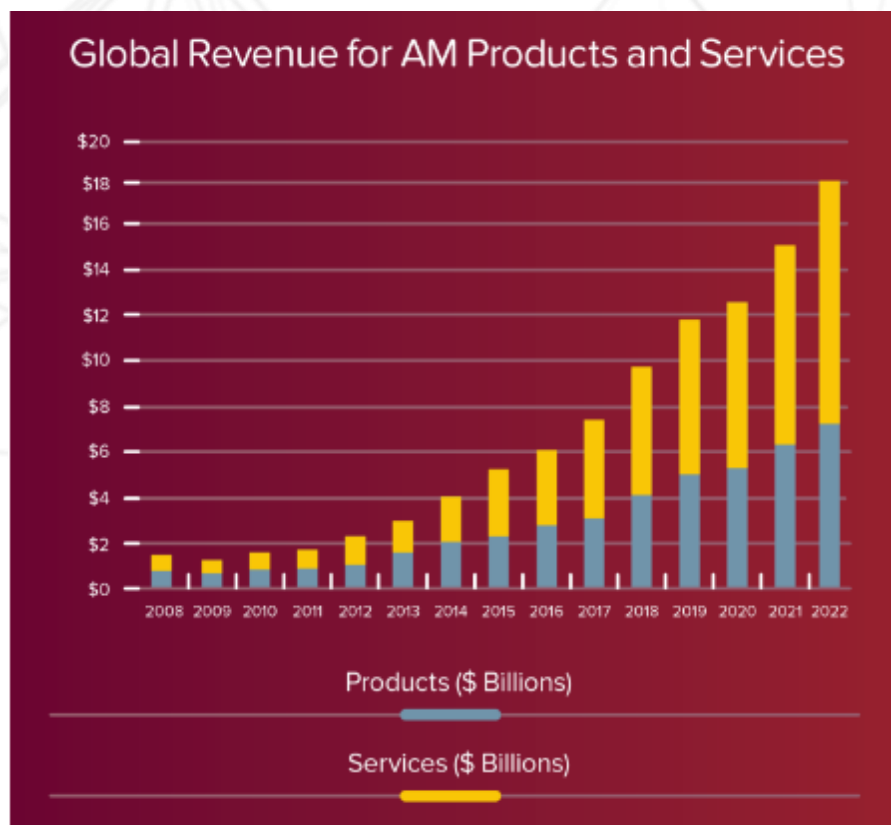


■ Рисунок 1 - Прототип автомобильной распределительной крышки, изготовленной в 1987 г. с использованием машины для фотополимеризации

Однако, из-за определенных недостатков традиционных технологий производства, которые включают в себя наличие отходов, длительное время изготовления и недостаточную универсальность, АП все чаще используется для создания конечных деталей со сложной геометрией и высокой добавленной стоимостью [5]. Таким образом, промышленное использование этих методов выросло и представляет собой рынок с оборотом в миллиарды долларов ежегодно [6]. Отчет Wohlers за 2023 указывает на то, что в 2022 году услуги 3D-печати показали рост примерно на 16,7 %, что представляет собой немного меньший

прирост по сравнению с предыдущим годом, который составлял увеличение на 19,5 %, что привело к инвестициям примерно в 15 миллиардов долларов в бизнес АП в мире, как показывают данные на рисунке 2 [7]. Кроме того, АП представлен как ключевой элемент производства с точки зрения устойчивого развития. В различных исследованиях особое внимание уделяется энергосбережению, сокращению выбросов и перспективам, возникающим в результате возможности самостоятельного производства потребителем [8], что демонстрирует его текущую и будущую важность.





■ Рисунок 2 - Глобальный доход от продуктов и услуг АП [8]

Эти технологии связаны с потенциально мощными перспективами для устойчивого развития и позволяют экономить время и средства [9–12]. Обладая такими преимуществами, как обработка материалов без использования инструментов, высокая геометрическая свобода, быстрое прототипирование и экономичное мелкосерийное производство, АП способно произвести революцию в обрабатывающей промышленности [13]. Wittbrodt и др. показали, что даже при крайне консервативном предположении о том, что если домохозяйство будет использовать 3D-принтер только для изготовления 20 изделий в год, экономия на закупочных расходах составит примерно от 300 до 2000 долларов США в год [14].

Размер современного рынка АП в 2022 году составил более 18×10⁹ долларов США при темпах роста около 15-25 % [15]. Таким образом, мировые промышленные лидеры и эксперты прогнозируют, что к 2030 году две трети всей производимой продукции в мире будет производиться с использованием 3D напечатанных компонентов, а к 2030-2050 годам в ряде отраслей обрабатывающей промышленности 3D-печать позволит печатать полностью готовые изделия [16]. **ГЛОБАЛЬНЫЙ РОСТ АП МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ СЛЕДУЮЩИМИ ОСНОВНЫМИ ПРЕИМУЩЕСТВАМИ:**

- уменьшение количества сырья, требуемого в цепочке поставок;
- снижение потребности в энергоёмких,

- расточительных и загрязняющих окружающую среду производственных процессах. Предполагаемая экономия первичной энергии в сценарии быстрого внедрения достигла 70-174 ПДж в год в 2050 году по всему автопарку, при совокупной экономии 1,2-2,8 ЭДж [17];
- более эффективный, гибкий и генеративный дизайн продукта с улучшенными функциональными и эксплуатационными характеристиками и биомимикрией;
- уменьшен вес продуктов, связанных с транспортировкой, и уменьшен углеродный след. Совокупное сокращение выбросов парниковых газов было оценено в 92,8–217,4 млн тонн [17];
- децентрализованное производство, приближенное к месту потребления, упрощает логистику, транспортировку, хранение и цепочку поставок;
- сокращается время вывода продукции на рынок, благодаря чему продукты начинают коммерциализироваться быстрее благодаря гибкому и быстрому созданию прототипов и возможности немедленно вносить коррективы в дизайн, а также проводить предпродажные испытания продуктов, обеспечивая компаниям, использующим эти методы, большую конкурентоспособность. Кроме того, благодаря постоянному развитию этих технологий, с каждым разом вместо прототипов изготавливается все больше конечных деталей;



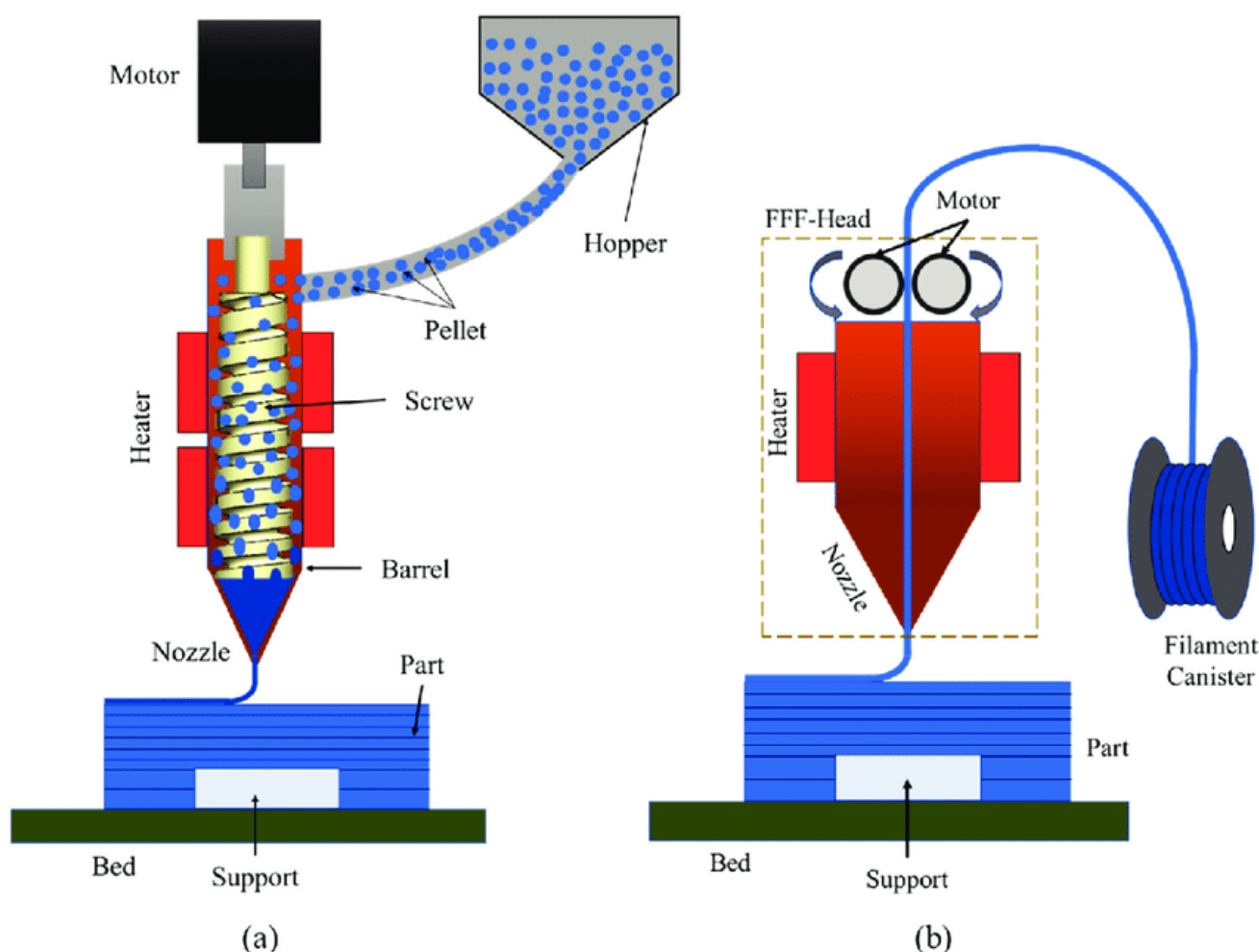
- сокращается время вывода продукции на рынок, благодаря чему продукты начинают коммерциализироваться быстрее благодаря гибкому и быстрому созданию прототипов и возможности немедленно вносить коррективы в дизайн, а также проводить предпродажные испытания продуктов, обеспечивая компаниям, использующим эти методы, большую конкурентоспособность. Кроме того, благодаря постоянному развитию этих технологий, с каждым разом вместо прототипов изготавливается все больше конечных деталей;

- сокращение количества оснастки;
- сокращение запасов и консолидация деталей;
- сокращение времени выполнения заказа по требованию заказчика;
- экологичность и сокращение отходов. Внедрение АП способствует обеспечению устойчивости развития, необходимого планете для борьбы с изменением климата. Снижается потребление энергии, а также затраты на транспортировку. Кроме того, некоторые специфические технологии 3D-производства позволяют перерабатывать и повторно использовать первичные материалы, что позволяет максимально эффективно использовать материал и генерировать

наименьшее количество отходов.

Согласно стандарту ISO/ASTM 52900:2015, экструзия материала является одним из семи подходов к обработке материалов с помощью 3D-печати [18]. В этом методе материал расплавляется, проталкивается через сопло и наносится слой за слоем, чтобы воспроизвести ранее разработанную модель объекта. В зависимости от формы материала и типа экструдера АП на основе экструзии можно разделить на изготовление плавленными гранулами и изготовление плавленными нитями (FFF), представленные на рисунке 3 соответственно.

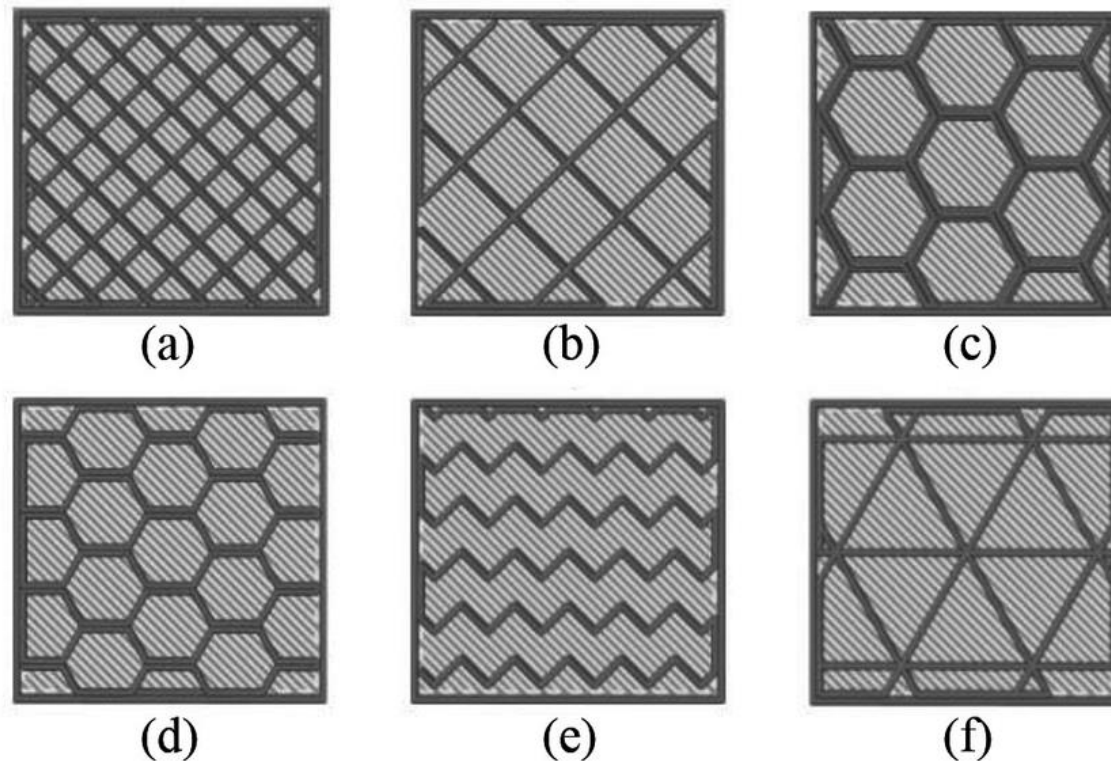
Наиболее широко используемым АП среди экструзионных АП является FFF из-за его простоты, низких эксплуатационных расходов и материальных затрат [19]. Это послойный процесс АП, в котором используется термопластичная нить путем наплавления, которая передается зубчатыми колесами. Этот метод также известен как моделирование наплавленных отложений (FDM), зарегистрированный торговой маркой Stratasys Inc в конце 1980-х годов [20]. Его популярность основана на его относительной простоте и широкой доступности недорогих решений на рынке [21].



■ Рисунок 3 - Схематическая диаграмма (а) изготовления плавленными гранулами и (б) изготовления плавленными нитями [22]



Схема заполнения доступна в различных формах и геометриях: возможны прямые, сетчатые, полные соты, частичные соты, волны или треугольники указанные на рисунке 4.



■ Рисунок 4 – Примеры схем заполнения: (а) прямая, (b) сетка, (c) соты, (d) частичные соты, (e) волны и (f) треугольник [23]

Рисунок заполнения существенно влияет на механические характеристики и жесткость печатных деталей.

Таким образом одним из элементов обеспечения уверенности в компонентах, изготовленных с использованием аддитивного моделирования, является использование общепризнанных стандартизированных тестов для измерения основных механических свойств, включая предел прочности при растяжении и сопротивление усталости. В настоящее время существует проблема сходства между специально изготовленными испытательными образцами и реальными компонентами для измерения этих механических свойств. Любое изменение геометрии детали, количества сборок на пластину, параметров конструкции (лазерные рисунки, ориентация слоев, опорная структура) может существенно повлиять на термическую историю, что в конечном итоге изменяет детали микроструктуры и статистику типов дефектов. Это, в свою очередь, может сильно повлиять на механические свойства, особенно на усталостное поведение деталей АП [24].

Наиболее распространенным или основным механическим испытанием для получения значений

сопротивления рассматриваемых материалов является испытание на растяжение [25]. ISO 17296-3:2014 рекомендует ISO 527 для испытаний на растяжение. Испанский национальный стандарт UNE 116005:2012 полностью ориентирован на проведение механических испытаний, особенно испытаний на растяжение, и только с полимерными материалами. ISO 527 также является стандартом, определяющим стандарт UNE 116005:2012 в качестве эталона для испытаний на растяжение. Так, ISO 527, ориентированный на определение свойств пластических материалов при растяжении, рассматривается в двух стандартах по аддитивному производству. В свою очередь, этот стандарт состоит из пяти различных частей (таблица 1). Первый касается общих принципов [26], а следующие четыре устанавливают условия для определения свойств при растяжении в литевых и экструзионных пластмассах, пленках и листах, а также в изотропных и ортотропных армированных волокнами пластиковых композитах соответственно [27]. Так, вторая часть, ISO 527-2:2012, ориентирована на испытания пластмасс для литья и экструзии, и этот случай понимается как более близкий к процессу производства FFF и FGF.

Стандарт	Описание
ISO 527-1:2019	Пластмассы. Определение свойств при растяжении. Часть 1: Общие принципы
ISO 527-2:2012	Пластмассы. Определение свойств при растяжении. Часть 2: Условия испытаний для литья и экструзии пластмасс
ISO 527-3:2018	Пластмассы. Определение свойств при растяжении. Часть 3: Условия испытаний пленок и листов
ISO 527-4:2023	Пластмассы. Определение свойств при растяжении. Часть 4. Условия испытаний изотропных и ортотропных пластиковых композитов, армированных волокном.
ISO 527-5:2021	Пластмассы. Определение свойств при растяжении. Часть 5. Условия испытаний однонаправленных пластиковых композитов, армированных волокном.

■ **Таблица 1 - Части стандарта ISO 527 для испытаний пластмасс на растяжение**

В то время как многие компании изучили потенциал АП для создания новых бизнес-возможностей благодаря новым разработкам, которые ранее были невозможны и изменят структуру цепочек поставок, несколько препятствий препятствуют его более широкому внедрению. Одним из наиболее важных препятствий является квалификация частей АП. Многие производители и пользователи не имеют полной уверенности в том, что компоненты АП будут демонстрировать стабильное качество и надежность в различных принтерах и географических регионах [1].

Разработка спецификаций и стандартов в области АП, которые приняты промышленностью, особенно важна в этой быстро меняющейся среде и может

способствовать более быстрой и надежной квалификации, что, в свою очередь, могло бы ускорить сертификацию устройств/продуктов регулирующими органами [24].

Следует отметить, что существующие стандарты для материалов на основе полимеров носят очень общий характер, и не существует открытых стандартов, разработанных для материалов на основе полимеров [1]. Без наличия таких стандартов было бы невозможно провести надлежащее сравнение между различными процессами АП и внутри них [1]. Широко признано, что отсутствие стандартов АП замедлило внедрение систем АП в промышленные процессы [28].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Chua, C.K.; Wong, C.H.; Yeong, W.Y. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing; Elsevier Ltd, 2017; ISBN 978 0 12 813489 4.
2. Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies; Springer-Verlag, 2015; ISBN 9781441911193; 1441911197; 9781489983640; 1489983643.
3. Singh, S.; Prakash, C.; Ramakrishna, S. 3D Printing of Polyether-Ether-Ketone for Biomedical Applications. Eur. Polym. J. 2019, doi:10.1016/j.eurpolymj.2019.02.035.
4. Wohlers Associates Additive Manufacturing and 3D Printing: State of the Industry. Wohlers Rep. 2013, 14.
5. Bogers, M.; Hadar, R.; Bilberg, A. Additive Manufacturing for Consumer-Centric Business Models: Implications for Supply Chains in Consumer Goods Manufacturing. Technol. Forecast. Soc. Change 2016, 102, 225–239, doi:10.1016/j.techfore.2015.07.024.
6. Tofail, S.A.M.; Koumoulos, E.P.; Bandyopadhyay, A.; Bose, S.; O'Donoghue, L.; Charitidis, C. Additive Manufacturing: Scientific and Technological Challenges, Market Uptake and Opportunities. Mater. Today 2018, 21, 22–37, doi:10.1016/j.mattod.2017.07.001.
7. Wohlers Associates Wohlers Report 2023 Available online: <https://wohlersassociates.com/product/wr2023/>.
8. Ullah, A.M.M.S.; Hashimoto, H.; Kubo, A.; Tamaki, J. Sustainability Analysis of Rapid Prototyping : Material / Resource and Process Perspectives Hiroyuki Hashimoto Akihiko Kubo and Jun ' Ichi Tamaki. Int. J. Sustain. Manuf. 2013, 3, 20–36.
9. Rejeski, D.; Zhao, F.; Huang, Y. Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing; Elsevier B.V., 2018; Vol. 19; ISBN 0013523927303.
10. Cruz Sanchez, F.A.; Boudaoud, H.; Camargo, M.; Pearce, J.M. Plastic Recycling in Additive Manufacturing: A Systematic Literature Review and Opportunities for the Circular Economy. J. Clean. Prod. 2020, 264, 121602, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121602.



11. Brenken, B.; Barocio, E.; Favaloro, A.; Kunc, V.; Pipes, R.B. Fused Filament Fabrication of Fiber-Reinforced Polymers: A Review. *Addit. Manuf.* 2018, 21, 1–16, doi:10.1016/j.addma.2018.01.002.
12. Gebler, M.; Schoot Uiterkamp, A.J.M.; Visser, C. A Global Sustainability Perspective on 3D Printing Technologies. *Energy Policy* 2014, 74, 158–167, doi:10.1016/j.enpol.2014.08.033.
13. Sasse, J.; Pelzer, L.; Schön, M.; Ghaddar, T.; Hopmann, C. Investigation of Recycled and Coextruded PLA Filament for Additive Manufacturing. *Polymers (Basel)*. 2022, 14, doi:10.3390/polym14122407.
14. Wittbrodt, B.T.; Glover, A.G.; Laureto, J.; Anzalone, G.C.; Oppliger, D.; Irwin, J.L.; Pearce, J.M. Life-Cycle Economic Analysis of Distributed Manufacturing with Open-Source 3-D Printers. *Mechatronics* 2013, 23, 713–726, doi:10.1016/j.mechatronics.2013.06.002.
15. Wohlers associates Wohlers Report 2019 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry; 2019;
16. J'son & Partners Consulting 3D Printing Market in Russia and the World (Additive Manufacturing, AM), 2018 Available online: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056.
17. Peng, T.; Kellens, K.; Tang, R.; Chen, C.; Chen, G. Sustainability of Additive Manufacturing: An Overview on Its Energy Demand and Environmental Impact. *Addit. Manuf.* 2018, 21, 694–704, doi:10.1016/j.addma.2018.04.022.
18. ISO/TC 261 Additive manufacturing ISO/ASTM 52900:2015 Additive Manufacturing — General Principles — Terminology 2021, 19.
19. Breški, T.; Hentschel, L.; Godec, D.; Đuretek, I. Suitability of Recycled PLA Filament Application in Fused Filament Fabrication Process. *Teh. Glas.* 2021, 15, 491–497, doi:10.31803/tg-20210805120621.
20. Gardan, J. Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends. *Addit. Manuf. Handb. Prod. Dev. Def. Ind.* 2017, 7543, 149–168, doi:10.1201/9781315119106.
21. Marchewka, J.; Laska, J. Processing of Poly-l-Lactide and Poly(l-Lactide-Co-Trimethylene Carbonate) Blends by Fused Filament Fabrication and Fused Granulate Fabrication Using RepRap 3D Printer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 106, 4933–4944, doi:10.1007/s00170-020-04981-z.
22. 25Gupta, A.K.; Taufik, M. Improvement of Part Strength Prediction Modelling by Artificial Neural Networks for Filament and Pellet Based Additively Manufactured Parts. *Aust. J. Mech. Eng.* 2022, 00, 1–18, doi:10.1080/14484846.2022.2047472.
23. Hanon, M.M.; Marczis, R.; Zsidai, L. Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA. *Period. Polytech. Mech. Eng.* 2021, 65, 38–46, doi:10.3311/PPme.13683.
24. Seifi, M.; Gorelik, M.; Waller, J.; Hrabe, N.; Shamsaei, N.; Daniewicz, S.; Lewandowski, J.J. Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification. *Jom* 2017, 69, 439–455, doi:10.1007/s11837-017-2265-2.
25. Garcia-Dominguez, A.; Claver, J.; Camacho, A.M.; Sebastian, M.A. Analysis of General and Specific Standardization Developments in Additive Manufacturing from a Materials and Technological Approach. *IEEE Access* 2020, 8, 125056–125075, doi:10.1109/ACCESS.2020.3005021.
26. ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior ISO 527-1:2019 Plastics — Determination of Tensile Properties — Part 1: General Principles 2019, 26.
27. ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior ISO 527-2:2012 Plastics — Determination of Tensile Properties — Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics 2012, 11.
28. Monzón, M.D.; Ortega, Z.; Martínez, A.; Ortega, F. Standardization in Additive Manufacturing: Activities Carried out by International Organizations and Projects. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, 76, 1111–1121, doi:10.1007/s00170-014-6334-1.

