

УДК 778.64

Определение формы образца для исследования эффекта эрозии при 3D-печати методом селективного лазерного сплавления

Старков Иван Сергеевич

ivagameon@mail.ru

Петров Павел Александрович^(*)

petrov_p@mail.ru

SPIN-код: 6414-2654

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. Представлен краткий обзор формы образца, предназначенного для исследования влияния эффекта эрозии при 3D-печати методом селективного лазерного сплавления. Выявлены параметры, влияющие на качество изделий, изготавливаемых по технологии SLM. Показана взаимосвязь между параметрами газового потока в рабочем пространстве 3D-принтера и эффектом эрозии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, rapid prototyping, селективное лазерное сплавление, прямое лазерное спекание металла, SLM

Determination of sample shape for studying the erosion effect in 3D printing using selective laser melting

Starkov Ivan Sergeevich

ivagameon@mail.ru

Petrov Pavel Alexandrovich^(*)

petrov_p@mail.ru

SPIN-code: 6414-2654

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. The article presents a brief overview of the sample shape designed to study the influence of the erosion effect in 3D printing using the selective laser melting method. The parameters affecting the quality of products manufactured using SLM technology are identified. The relationship between the gas flow parameters in the working space of the 3D printer and the erosion effect is shown.

Keywords: additive technologies, rapid prototyping, selective laser melting, direct metal laser sintering, SLM

Введение. Аддитивные технологии на данный момент одна из наиболее активно развивающихся технических отраслей. Одним из наиболее укрепившихся в крупных производствах векторов развития аддитивного технологического сектора являются технологии, направленные на получение из металлических порошковых материалов конечных изделий или заготовок с минимальными припусками для заключительной чистовой обработки. Самой распространенной технологией является технология селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошковых материалов. Установки для аддитивной обработки металлических порошковых материалов

позволяют применять широкий спектр металлов, количество которых растет с каждым годом.

Селективное лазерное сплавление является одной из технологий аддитивного производства для производства сложных металлических заготовок и деталей. В данной технологии исходным материалом является металлический порошок, который сплавляет лазер слой за слоем, таким образом, создавая изделие. Одним из решающих факторов, влияющих на стабильность процесса и, следовательно, на качество изделия, является поток защитного газа. В дополнение к защитным свойствам инертной атмосферы поток газа отвечает за удаление побочных продуктов процесса, таких как брызги и сварочный дым, образующихся в технологической зоне. Недостаточное удаление или неравномерное распределение газового потока может привести к усилению взаимодействия между лазером и побочными продуктами процесса. Следствием этого является затухание лазерного пятна, а также повторное осаждение этих побочных продуктов на поверхностях, которые впоследствии подвергаются воздействию лазера [1]. Таким образом, недостаточное, нормальное или избыточное влияние газового потока на нанесенный слой металлического порошка характеризуется эффектом эрозии, который в недостаточной, нормальной либо избыточной мере, влияет на качество изделия во время печати.

На данный момент множество стран заинтересованы в развитии технологии селективного лазерного сплавления. Компании с опытом работы, развивающие данную технологию десятилетиями, такие как 3D Systems (США), EOS, Nikon SLM Solutions, ConceptLaser (Германия), Farsoon Technologies, ProtoFab (Китай) Renishaw plc (Британия) Лазерные Системы (Россия), а также молодые компании, такие как Росатом — Аддитивные технологии, ONSINT (Россия), LiM Laser (Китай), активно продолжают развивать и модернизировать технологию SLM. Следствием данного процесса является формирование свода нормативных документов: государственные, международные (ASTM, ISO, ГОСТ), которые подтверждают качество, как самого оборудования (3D-принтера), так и получаемых с его помощью заготовок или изделий. Однако, не смотря на это, данная технологическая сфера имеет еще множество «белых пятен», что, с одной стороны, является удобным инструментом для развития технического творчества.

На данный момент существует перечень ГОСТ, регламентирующий аддитивные технологии и термины, связанные с ней. Так, например ГОСТ Р 57558–2017 [2, 3] описывает как общую терминологию, так и в целом классифицирует технологии. Однако для определения качества изделий, получаемых методом селективного лазерного сплавления, принят ГОСТ Р 59586–2024 [4], который включает в себя перечень образцов (рис. 1), получение которых позволяет оценить возможности данной системы и качество ее калибровки.

Несмотря на то что описанный выше стандарт определяет собой качество работы самого 3D-принтера, работающего по технологии SLM и качество металлопорошковой композиции (МПК), используемой для 3D-печати, дан-

ный ГОСТ позволяет собрать только общие данные о проводимой печати. В связи с чем, для каждого материала, в первую очередь, разрабатываются сначала методы определенных испытаний, необходимые для подбора параметров 3D-печати, а уже в последующем, при успешном использовании, трансформируются, по необходимости, в рабочие инструкции, используемые внутри компании производителя, а далее, в полноценные ГОСТ.

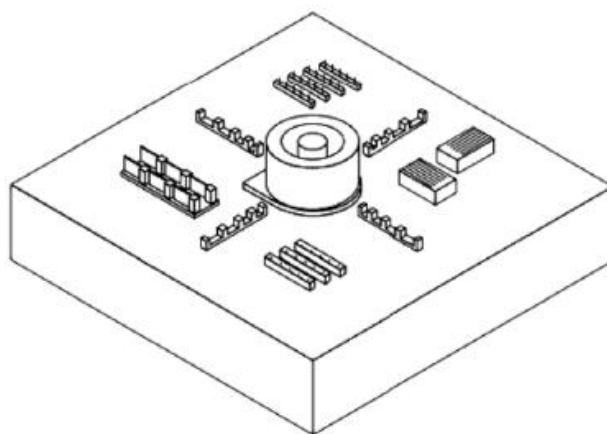


Рис. 1. Пример образцов представленных в ГОСТ Р 59586–2024, расположенных на платформе построения, для быстрой проверки плоскости XY

На данный момент множество людей и компаний пытаются найти способ контролировать такой параметр при 3D-печати методом SLM, как эрозия металлического порошка во время нанесения слоя. Проблематика данного эффекта заключается в том, что во время 3D-печати, когда наносится слой, газовый поток инертного газа выполняет несколько функций:

- заполнение камеры построения инертным газом, тем самым вытесняя из нее воздух;
- удаление из зоны построения частиц металлического порошка, которые не расплавились, а сгорали, трансформируясь в гарь/копоть;
- температурная регулировка зоны построения;
- ламинарность потока по всей зоне построения.

И как раз из-за того, что в зависимости от самого инертного, размеров частиц и типа металлопорошковой композиции, режима работы оптической системы, входных и выходных дефлекторов, а также скорости инертного газа будет возникать эффект эрозии, который будет на прямую влиять на функции выполняемые инертным газом. Следовательно, для определения наилучших значений необходимо не только разработать методику испытаний, но и создать либо подобрать соответствующую форму образца, 3D-печать которого позволит наиболее точно выявить все вышеописанные особенности процесса 3D-печати.

Так, например, ученые из VTT Technical Research Centre of Finland (Финский центр технических исследований VTT Ltd) в статье [5] описывают ис-

следование, изучающее влияние скорости потока защитного газа на пористость и геометрию ванны расплава в технологии SLM. Данное исследование смогло проиллюстрировать закономерность между скоростью газового потока и пористостью изделия. Было замечено, что снижение скорости потока газа приводит к резкой потере проходимости передвижения лазерного профиля по зоне построения (треков сканирования), что приводит к увеличению неплавящейся пористости на уровне детали. Данное заключение было получено на основе анализа образцов (рис. 2), специально спроектированных для данного исследования и изготовленных методом селективного лазерного сплавления на 3D-принтере SLM 125HL. Образцы же имели специфическую форму в связи с необходимостью сохранить печатаемый объем детали при каждом новом скоростном режиме газового потока и при этом сохранить повторяемость формы, позволяя проанализировать изменения поверхностей.

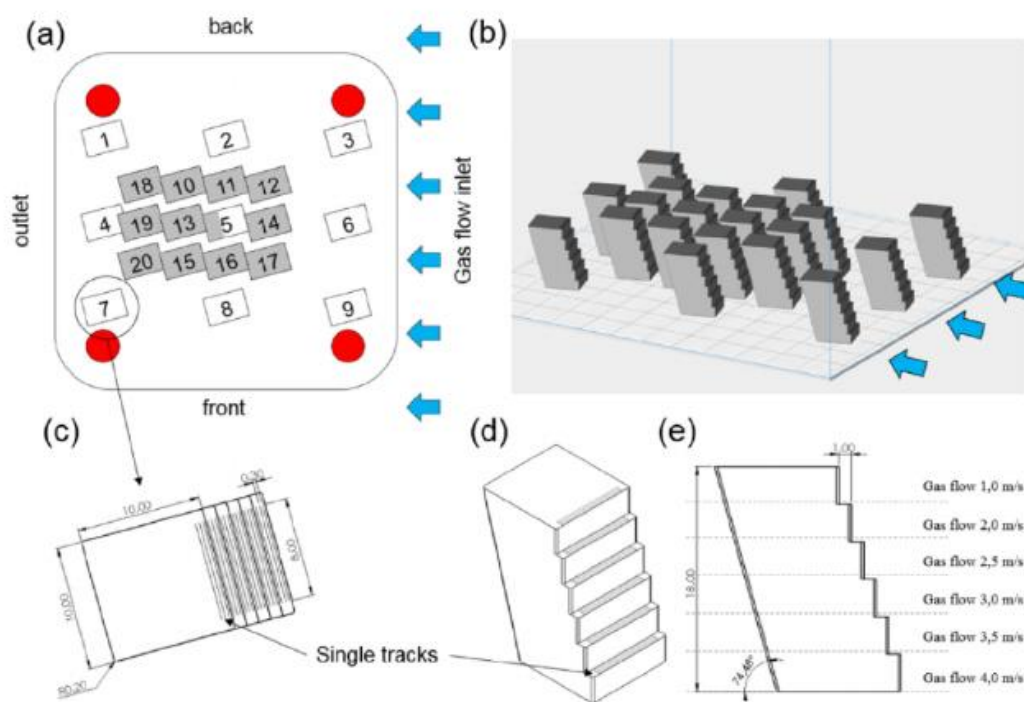


Рис. 2. *a–b* — расположение образцов на платформе построения;
c–d — общий вид образца лестницы ступенчатой конструкции

Ученые из центра аддитивного производства Монаша в статье [6] описывают исследование, результатом которого стало выявление закономерности, при которой в образцах (рис. 3), построенных при более низких скоростях газового потока, обнаруживается более высокая пористость при отсутствии дефектов плавления, таким образом свидетельствуя о значительном влиянии затухания лазерного шлейфа. После чего в рамках данного исследования были проведены эксперименты по улавливанию частиц для изучения предела дальнейшего увеличения скорости газового потока без нарушения порошкового слоя. 3D-печать образцов производилась на принтерах EOS M290 и

AmPro SP500. Образцы, которые печатались в рамках данного исследования, имели ромбовидное поперечное сечение, что было вызвано спецификой исследования для получения наибольшего спектра данных, которые позже использовались для анализа. И, таким образом, форма образцов позволила найти повторяемость получаемых данных в независимости от машины, на которой печатались исследуемые образцы.

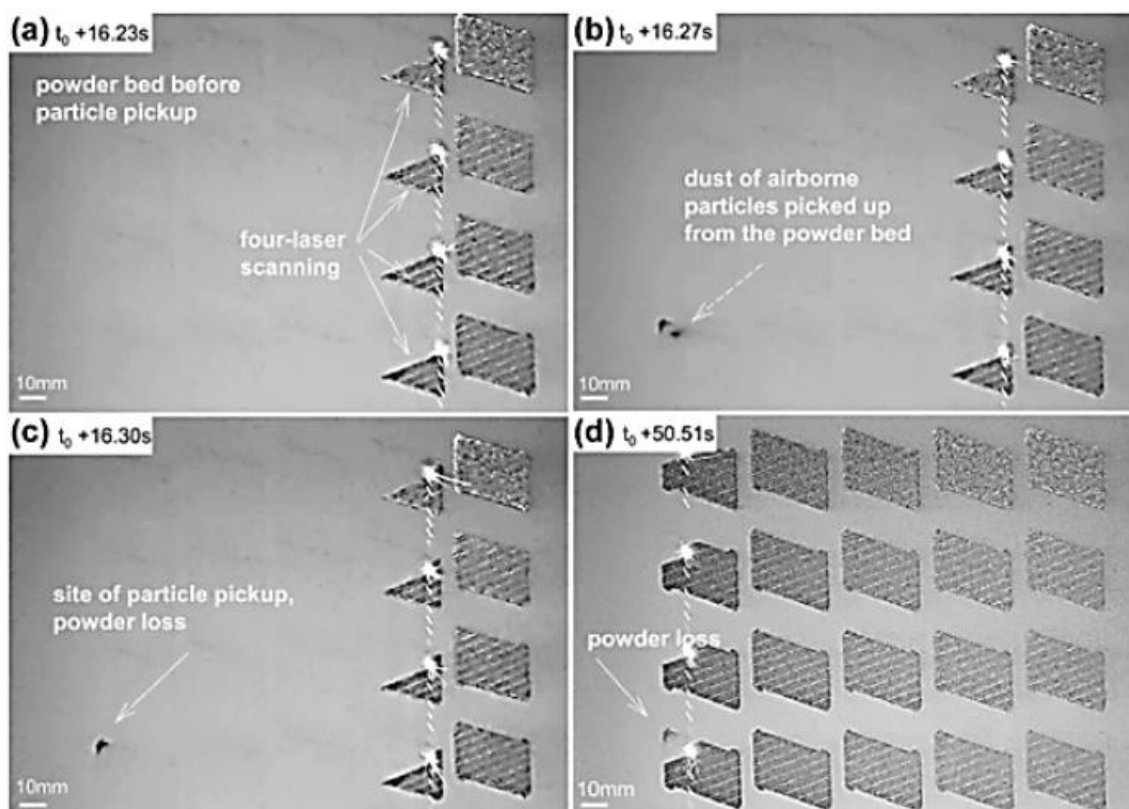


Рис. 3. Фото печати ромбовидных образцов, в принтере, работающем по принципу селективного лазерного сплавления

В статье [7] ученых из Технического университета Дании описываются результаты, показывающие корреляцию между низкой скоростью потока газа и повышенной пористостью, приводящей к снижению качества деталей. Условия локального потока на рабочей плите также напрямую влияют на компоненты, что подчеркивает важность оптимизации подсистемы потока газа. В рамках данного исследования печатались кубические, прямоугольные и цилиндрические образцы (рис. 4), что позволило увеличить их количество в рамках одной печати и таким образом дать более подробные данные о влиянии инертного газа и его скорости в зависимости от расположения изделия. Результаты исследований подтвердили необходимость тщательной настройки распределения потока газа таким образом, чтобы минимизировать зоны мертвых потоков и обеспечить равномерное насыщение инертным газом по всей поверхности печати.

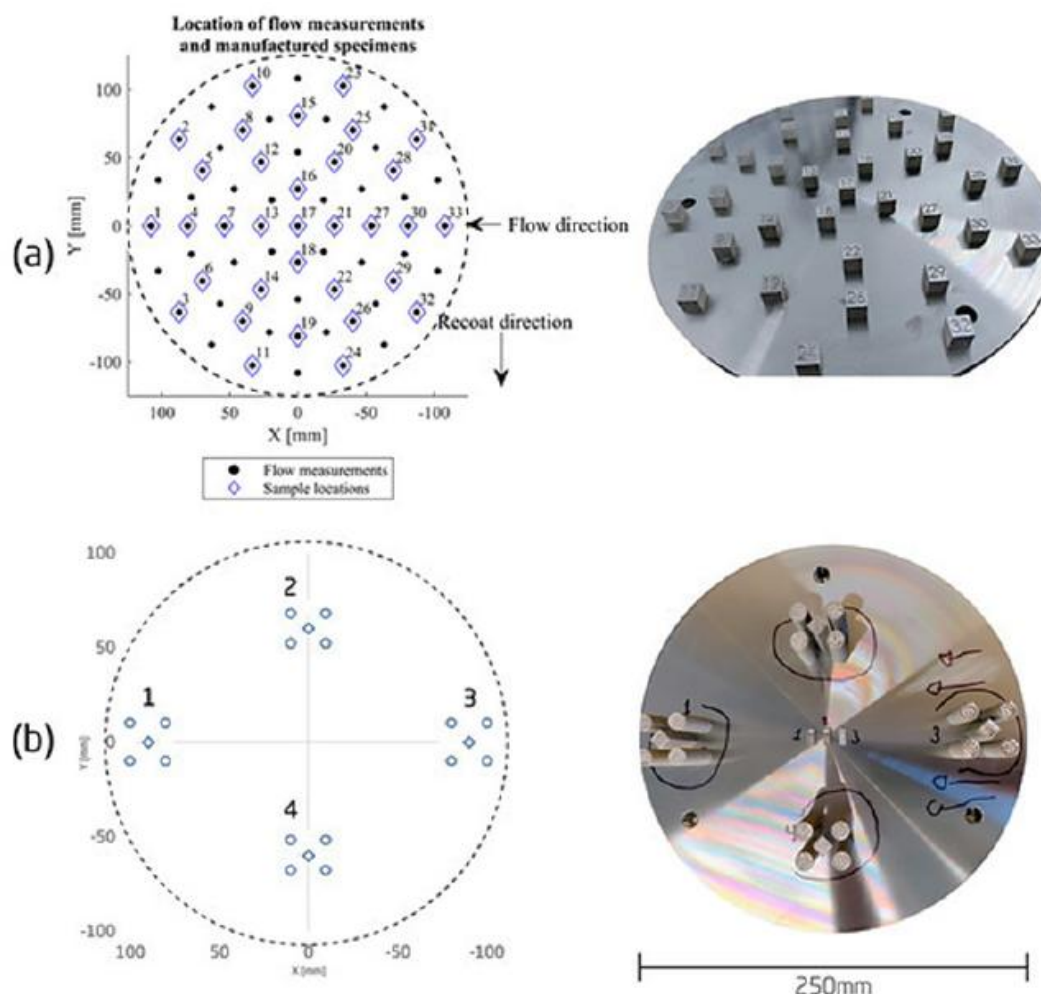


Рис. 4. Фото и схема местоположения и направления газовых потоков, а также размещение образцов:

a — нумерация указывает порядок сканирования в каждом слое для кубических образцов;
b — нумерация, указывающая на кластеры выборки цилиндрических и прямоугольных образцов

Закключение. В рамках аддитивных технологий метод селективного лазерного сплавления на данный момент, несмотря на стремительный рост темпов стандартизации, обеспечивающий базис для работы ученых, развитие и исследования в области подходов к решению задач, направлен на техническое улучшение данного метода. Были уже отобраны и применены для изучения такие образцы: 1) лестнице-ступенчатой конструкции; 2) ромбовидные; 3) кубические; 4) прямоугольные; 5) цилиндрические.

Таким образом, можно увидеть, что образцы подбираются и изменяют свою форму в зависимости от специфики конкретного исследования, вне зависимости от общности проблематики данных исследований, затрагивающих влияние газового потока, а также эффекта эрозии. Следовательно, данное направление является актуальным для поиска новых инженерных решений, основанных на систематизации натурных экспериментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Ladewig A., Schlick G., Fisser M., Schulze V., Glatzel U. Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing*, 2016, vol. 10, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.01.004>
- [2] ГОСТ Р 57558–2017. *Аддитивные технологические процессы базовые принципы. Часть 1. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 2018, 12 с.
- [3] ГОСТ Р 57589–2017. *Аддитивные технологические процессы базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования*. Москва, Стандартинформ, 2017, 12 с.
- [4] ГОСТ Р 59586–2024. *Аддитивные технологии. Образцы для испытаний. Оценка геометрических способностей систем аддитивного производства*. Москва, Стандартинформ, 2025, 45 с.
- [5] Reijonen J., Revuelta A., Riipinen T., Ruusuvuori K., Puukko P., On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, art. no. 101030. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101030>
- [6] Shen H., Rometsch P., Wu X. et al. Influence of Gas Flow Speed on Laser Plume Attenuation and Powder Bed Particle Pickup in Laser Powder Bed Fusion. *JOM*, 2020, vol. 72, pp. 1039–1051. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04020-y>
- [7] Kjer M.B., Pan Z., Nadimpalli V.K., Pedersen D.B. Experimental analysis and spatial component impact of the inert cross flow in open-architecture laser powder bed fusion. *J. Manuf. Mater. Process*, 2023, vol. 7 (4), no. 143, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/jmmp7040143>