

УДК 778.64

Методика определения компенсации пучка лазерного луча и масштабного коэффициента при изготовлении металлических образцов методом SLM

Петрищев Даниил Юрьевич

petrishhev.daniil@gmail.com

Петров Павел Александрович^(*)

petrov_p@mail.ru

SPIN-код: 6414-2654

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности подготовки данных при изготовлении металлических изделий по технологии селективного лазерного сплавления. Выделены группы геометрических размеров, влияющих на качество изготавливаемого изделия. Предложена методика определения компенсации отклонения пучка лазерного луча и масштабных коэффициентов по оси X и по оси Y . Выполнена проверка предложенной методики, показавшая достаточно хорошее совпадение расчетов с результатами опытов.

Ключевые слова: аддитивное производство, технология селективного лазерного сплавления, SLM, 3D-печать, сталь 316L

An approach for determining laser beam compensation and scale factor in the fabrication of metal samples by SLM

Petrishchev Daniil Yurievich

petrishhev.daniil@gmail.com

Petrov Pavel Alexandrovich^(*)

petrov_p@mail.ru

SPIN-code: 6414-2654

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. The features of data preparation in the manufacture of metal products using selective laser melting technology are considered. Groups of geometric dimensions that affect the quality of the manufactured product are identified. A method for determining the compensation for the deviation of the laser beam and the scaling factors along the X axis and along the Y axis is proposed. The proposed method is verified, showing a fairly good match between the calculations and the experimental results.

Keywords: additive manufacturing, selective laser melting technology, SLM, 3D printing, 316L steel

Введение. Свобода проектирования является основным преимуществом аддитивного производства (АП), однако для гарантирования производства металлических изделий, требуемых формы и размеров (по чертежу), необходима их точная оценка на этапе контроля качества, которая может быть выполнена с применением передовых (цифровых) измерительных систем. В данном исследовании рассматривается возможность использования видео-

измерительной машины (ВИМ) для измерения образцов, изготовленных из стали 316L по аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (СЛС, SLM — Selective Laser Melting). Типовая схема процесса СЛС показана на рис. 1.

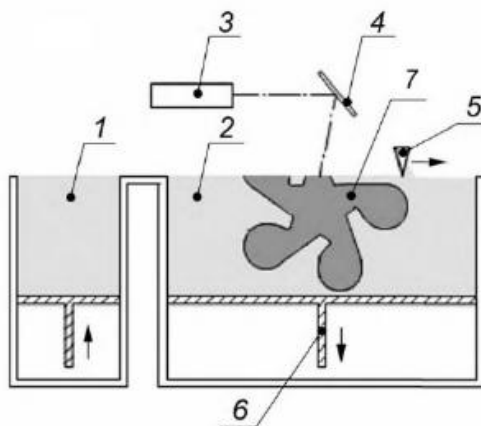


Рис. 1. Схема технологии СЛС по ГОСТ Р 57589–2017:

- 1 — система подачи порошка; 2 — порошкообразный материал, распределенный в ванне; 3 — лазер;
4 — установленное под углом зеркало, фокусирующее падающий на него свет; 5 — дозирующее устройство; 6 — платформа построения; 7 — изготавливаемое изделие

В статье [1] выделены следующие факторы, влияющие на точность деталей изготавливаемых по технологии СЛМ: несовершенство сканирующей системы, усадка материала, диаметр пятна лазера и зона термического влияния, программное обеспечение для нарезки, случайные ошибки. Современное программное обеспечение для нарезки (слайсинга) за счет параметров компенсации пучка и масштабного коэффициента позволяет увеличить точность 3D-печати. Механика компенсации пучка подробно описана в статье Моесен, Крейс и др., опубликованной в 2011 г. [2]. Чтобы найти численные значения этих параметров необходима методика их определения. Цель нашей работы — выполнение исследования и обобщение их результатов для разработки методики определения оптимальных (рациональных) значений компенсации пучка и масштабного коэффициента при применении СЛС технологии.

Материалы и методы. Первым этапом данного исследования при выбранном режиме сплавления является изготовление образца (рис. 2 и 3) без компенсации отклонения пучка лазерного луча (перевод с англ. beam offset) и с масштабным коэффициентом равным единице. 3D-печать осуществлялась на SLM-принтер LiM-X260, из порошка стали 316L (ближайший российский аналог — сталь конструкционная 03X17H14M3), имеющего размерность фракции 10–63 мкм, высота слоя при 3D-печати — 50 мкм.

Далее платформа построения (рис.1) вместе с изготовленным образцом передается на участок контроля качества, где с применением системы видеозамерения NVMII-5040CNCi осуществляется контроль образца. В статье [3] описана методика измерения образцов при помощи контрольно-измерительной машины (КИМ). Автор статьи [3] указывает, что из-за большой шероховатости, значения измерений могут отличаться на 50–70 мкм, что

вызывает необходимость в проведении как можно большего количества измерений на измеряемой плоскости. В отличие от КИМ ВИМ захватывает сразу весь контур детали усредняя отклонения, связанные с шероховатостью.

Для измерения геометрических отклонений в статье Б.С. Рупал и др. [4] образцы измерялись как не отделенными от плиты, так и отделенными. В рамках работы изготовленный образец (рис. 3) не отделялся от плиты во избежание коробления, вызванного внутренними напряжениями в теле образца, и не измерялся в отделенном состоянии, поскольку в этом случае основное влияние на отклонения будет оказывать термообработка, что не является объектом нашего исследования. Кроме того, образец не подвергался никакой пост-обработке после 3D-печати методом СЛС.

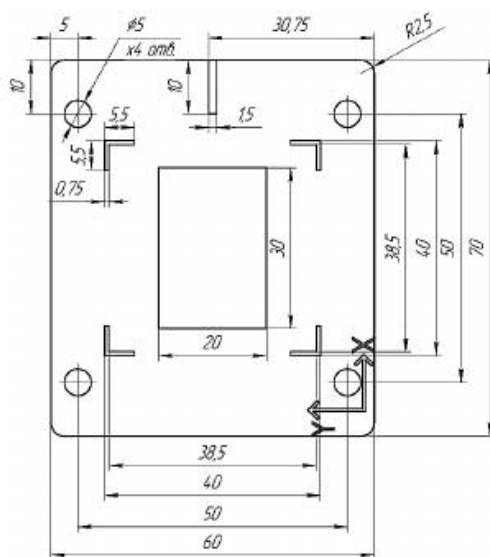


Рис. 2. Эскиз изготовленного образца, используемого для определения компенсации пучка и масштабного коэффициента

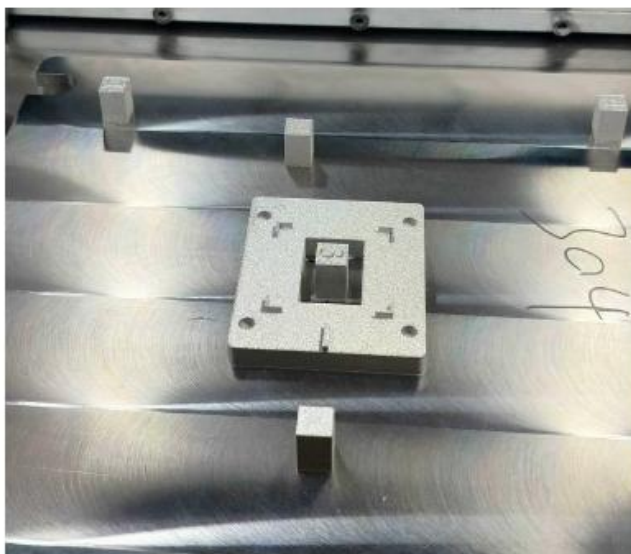


Рис. 3. Образец (первый), изготовленный в рамках нашего исследования

ВИМ оснащена камера и системой освещения. За счет фокусировки камеры и настройки системы освещения возможно добиться четкого изображения кромки детали. На основании этого изображения программное обеспечение машины выявляет контур детали и его основе проводятся дальнейшие измерения.

Таким образом, первым этапом методики точного измерения является получение четкого контура детали на изображении. Как видно на рис. 4, детали, изготовленные методом СЛС, имеют не ровный контур из-за высокой шероховатости поверхности, и, кроме того, поверхностью с неравномерным блеском. По этим причинам программное обеспечение ВИМ не всегда корректно определяет контур элементов. В связи с этим сделано предположение, что по аналогии с 3D-сканированием, перед измерением, образец необходимо покрыть матирующим спреем. При помощи матирующего спрея удалось избавиться от бликов, и хоть поверхность осталась такой же шероховатой, визуально, как видно на рисунке, программное обеспечение стало лучше справляться с задачей определения четкого контура детали.

Полученный образец был измерен на ВИМ с покрытием матирующим спреем и без него. Полученные измерения сопоставлены с результатами ручных обмеров, полученных при помощи микрометра. Результаты с ВИМ покрытого образца оказались максимально близкими к результатам ручных измерений. Таким образом, в дальнейшем используются результаты измерений покрытых образцов.

Следующим этапом исследования в данной статье является обработка данных, полученных при измерении первого образца. Получены значения для корректировки отступа луча и масштабирования (масштабного коэффициента). Процесс обработки и значения представлены в разделе «Результаты». На основании полученных значений, для их подтверждения был изготовлен и измерен второй образец.

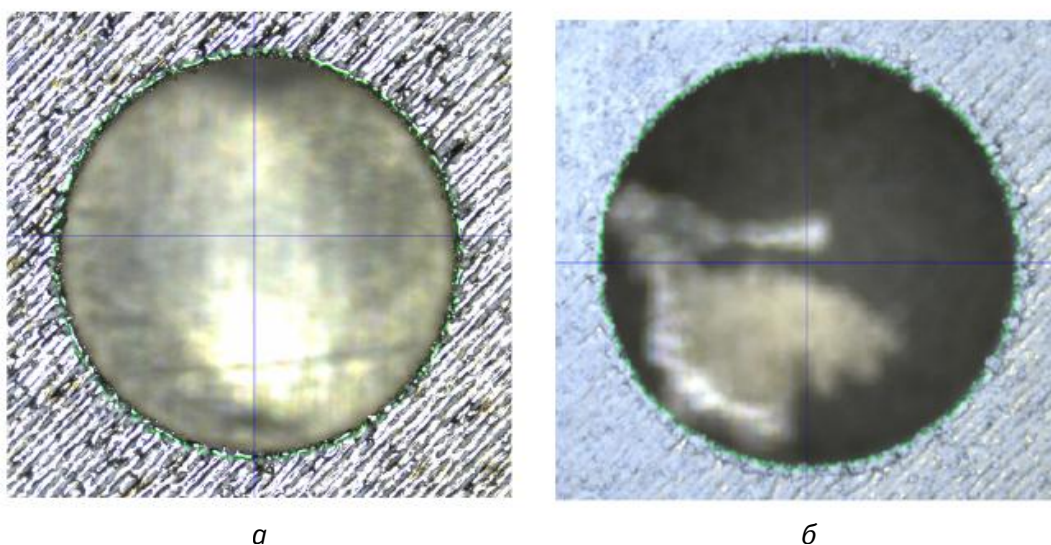


Рис. 4. Фотографии изготовленного первого образца, полученные с применением ВИМ:
а — без покрытия; *б* — с покрытием

Результаты. Форма и размеры образца (рис. 2) выбраны так, чтобы оценить, как внутренние, так и внешние размеры. Также на образце присутствуют элементы разных размеров, на которые искомые параметры будут влиять в разной степени. В статье Т. Лиенеке и др. [5] обосновывается выбор выделенных групп размеров для определения геометрических отклонений в 3D-печати.

В представленном исследовании размеры также разделены на внешние, внутренние и размеры между элементами. Такое деление необходимо поскольку на внешние и внутренние размеры компенсация будет действовать в разные стороны. Для одинаковых элементов определяется средний размер (среднее арифметическое либо медиана). Далее для всех размеров определяется отклонение от номинала (среднее, минимальное, максимальное и разброс между минимумом и максимумом). На рис. 5 показаны результаты расчетов отклонения с учетом компенсации. В дальнейшем измеренный разброс можно интерпретировать как поле допуска для изготавливаемых деталей методом селективного лазерного сплавления.

Масштабный коэффициент рассчитывается по четырем наибольшим размерам детали, выделенным по эскизу изготавливаемого первого образца. В нашем случае это размеры 70, 50, 40 и 30 мм для оси X и 60, 50, 40, 20 мм для оси Y (рис. 2). Желаемые размеры делятся на фактические, и находится среднее значение для каждой оси. Формула (1) позволяет определить масштабный коэффициент по оси N (N — ось X либо ось Y) для i -го размера; формула (2) — средний масштабный коэффициент по оси N :

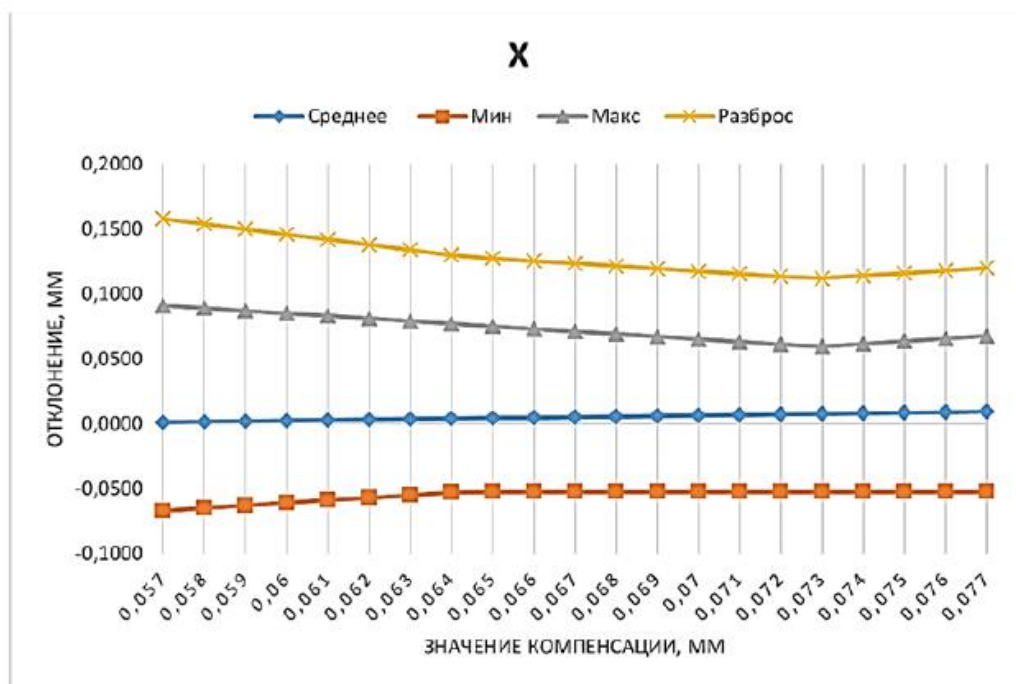
$$\begin{aligned} &\text{Коэффициент на } i - \text{й размер по оси } N = \\ &= 1 + \frac{(\text{Размер номинальный} - \text{Размер фактический})}{\text{Размер фактический}}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\text{Коэффициент средний по оси } N = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Коэффициент на } i - \text{й размер}. \end{aligned} \quad (2)$$

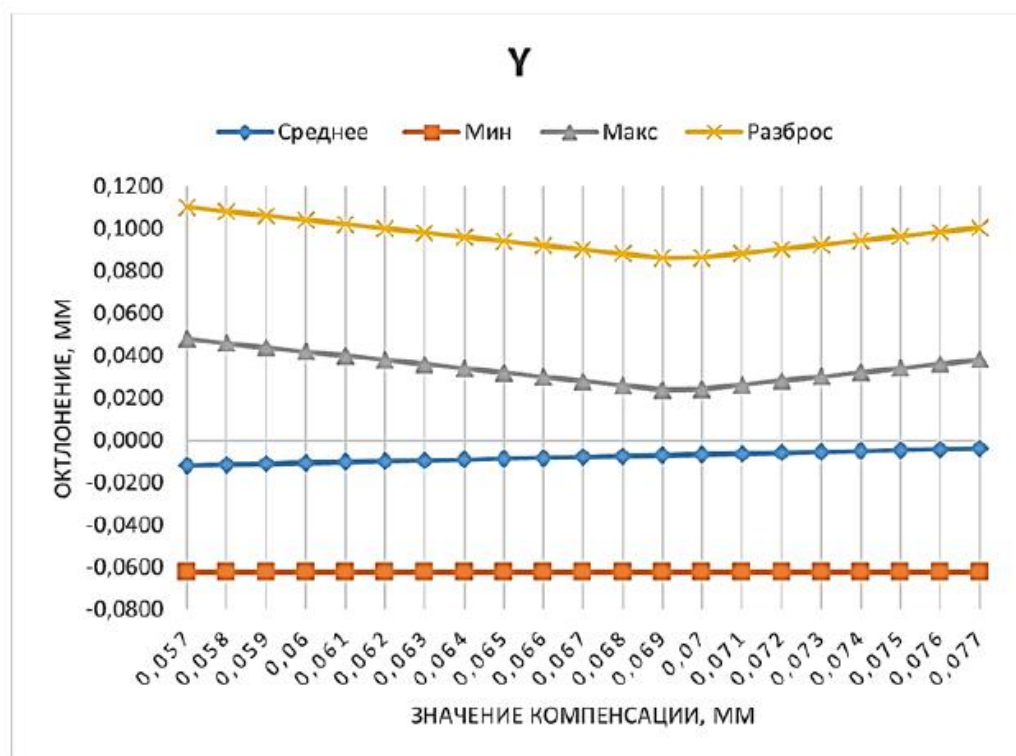
К полученным отклонениям применяется компенсация в диапазоне значений, выбираемых пользователем 3D-принтера. Данный диапазон лежит в пределах от нуля до значения диаметра лазерного пятна, отличающегося от машины к машине. После нахождения экстремумов на графике, шаг и диапазон значений можно уменьшить, как показано на рис. 5. Здесь в диапазоне 20 мкм с шагом 1 мкм представлены расчетные значения отклонений.

На полученном графике (рис. 5) хорошо видно, что нет какого-то одного конкретного значения, которое обеспечивает максимальную точность 3D-печати. Значение компенсации пучка следует выбирать исходя из минимального разброса отклонений. Как видно из графиков для оси Y это будет 69–70 мкм. В случае же с осью X значение разброса имеет не такой четко выраженный экстремум (минимум), он находится в районе 73 мкм.

По полученным данным были выбраны значения масштабного коэффициента 1,002 для обеих осей, и значение компенсации пучка равное 70 мкм. Далее был изготовлен второй образец с этими значениям и обмерен при помощи ВИМ как предыдущий, первый образец.



а



б

Рис. 5. Значения компенсации пучка лазерного луча:

а — по оси X; б — по оси Y

В таблице представлены значения отклонения, полученные по результатам измерения размеров первого образца; предсказанные (расчетные) значения отклонения с учетом найденных параметров — компенсации пучка и масштабными коэффициентами, а также значения, полученные по результатам измерения размеров второго образца.

Значения отклонения пучка лазерного луча (в мм)

Ось	Значение	Отклонение размеров (фактическое) от номинального значения (рис. 2) для первого образца	Отклонение размеров (предсказание) от номинального значения (рис. 2)	Отклонение размеров (фактическое) от номинального значения (рис. 2) для второго образца*
X	Среднее	0,0314	0,0065	0,0113
	Минимальное	−0,1790	−0,0523	−0,0477
	Максимальное	0,2815	0,0651	0,0669
	Разброс	0,4605	0,1174	0,1146
Y	Среднее	0,0116	−0,0067	−0,0138
	Минимальное	−0,1623	−0,0623	−0,0976
	Максимальное	0,2309	0,0241	0,0329
	Разброс	0,3932	0,0864	0,1305
* Второй образец подготовлен по результатам расчет фактического отклонения размеров первого образца и учета найденных масштабных коэффициентов по оси X и по оси Y, а также компенсации отклонения пучка лазерного луча.				

Обсуждение полученных результатов. Измерения, полученные при помощи ВИМ, дают более точные значения по сравнению с ручными измерениями. Кроме того, ВИМ позволяет получить значения, усредненные по всей длине измеряемой кромки, что позволяет избежать погрешности, связанные с неровностью измеряемой поверхности. Как видно из таблицы, значения отклонения, полученные на втором образцы, не только показывают лучшую точность 3D-печати, но и малое отклонение от предсказываемого значения. Исходя из этого можно предположить, что рассмотренная методика подбора значений компенсации пучка и масштабного коэффициента обеспечивает достаточно высокую точность.

Заключение. По результатам проведенных исследований представлены рекомендации для проведения измерений образцов, изготовленных из стали 316L или иного металлического материала по технологии селективного лазерного сплавления для определения компенсации пучка и масштабного коэффициента. Показано, что использование ВИМ позволяет повысить точность получаемых измерений и способствует уменьшению затрат на изготовление образцов. Также предложена методика для нахождения оптимальных значений компенсации пучка и масштабного коэффициента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Tang Y., Loh H.T., Fuh J.Y.H., Wong Y.S., Lu L., Ning Y., Wang X. Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering. *Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST)*, 2004, pp. 1–8.
- [2] Moesen M., Craeghs T., Kruth J.P., Schrooten J. Robust beam compensation for laser-based additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2011, vol. 43 (8), pp. 876–888.
- [3] Berez J., Praniewicz M., Saldana C. Assessing laser powder bed fusion system geometric errors through artifact-based methods. *Procedia Manufacturing*, 2021, vol. 53, pp. 395–406.
- [4] Rupal B.S., Singh T., Wolfe T., Secanell M., Qureshi A.J. Tri-Planar geometric dimensioning and tolerancing characteristics of SS 316L laser powder bed fusion process test artifacts and effect of base plate removal. *Materials*, 2021, vol. 14 (13), art. no. 3575.
- [5] Lieneke T., Adam G.A.O., Leuders S., Knoop F., Josupeit S., Delfs P., Zimmer D. Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. *Conference: 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium — An Additive Manufacturing Conference*. Austin, Texas, 2015, pp. 1–15.