

СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Балякин А.В.¹, Скуратов Д.Л.¹, Хаймович А.И.¹, Смелов В.Г.¹, Злобин Е.П.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва, г. Самара, balaykinav@ssau.ru

Ключевые слова: *прямое лазерное выращивание, лазерная расфокусировка, рельеф поверхности, отклонение высоты наплавки, нестабильность высоты наплавки, максимальная высота поверхности, металлические брызги.*

Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) из металлического порошка является перспективным методом аддитивного производства сложнопрофильных заготовок. Однако нестабильность высоты наплавки и наличие металлических брызг на поверхности ограничивают его широкое применение [1]. Величина расфокусировки лазерного луча существенно влияет на взаимодействие излучения с порошком и подложкой, формируя рельеф верхней поверхности и боковых стенок [2-4]. Цель работы – экспериментально исследовать влияние величины и знака расфокусировки лазера на параметры рельефа поверхности заготовок, получаемых методом ПЛВ.

Для количественной оценки рельефа верхней поверхности предложены два параметра: отклонение от средней высоты наплавки и нестабильность высоты наплавки. Для характеристики боковых стенок введены максимальная высота поверхности, эквивалентная высота поверхности и коэффициент поверхности. Сравнение относительной амплитуды и относительного отклонения показало, что наиболее информативным является параметр максимальная высота поверхности

Эксперименты проведены на роботизированной установке ПЛВ «ИЛИСТ L» (лазер YLS-2000, мощность 2000 Вт, скорость сканирования 25 мм/с, подача порошка 25,6 г/мин). Выращены полые квадратные стенки из жаропрочного сплава ЭП648 при расфокусировке лазера от $-1,5$ до $+1,5$ мм (шаг 0,5 мм). Отрицательная расфокусировка соответствует положению фокальной плоскости ниже поверхности построения, положительная – выше.

Установлено, что при положительной расфокусировке отклонение высоты наплавки меньше, а стабильность высоты лучше, чем при отрицательной (при одинаковом абсолютном значении) [5]. Для величины расфокусировки $\pm 1,5$ мм отклонение при положительном знаке составило около $+0,3$ мм, при отрицательном – около $-0,1$ мм (недостаточный припуск). Нестабильность высоты при отрицательной расфокусировке почти в два раза выше, что свидетельствует о самостабилизации процесса в условиях положительной расфокусировки. Механизм самостабилизации объясняется тем, что на выпуклых участках при положительной расфокусировке высота слоя уменьшается, а на вогнутых – увеличивается, выравнивая поверхность. При отрицательной расфокусировке, напротив, неровности усиливаются.

Качество боковых стенок лучше при отрицательной расфокусировке: максимальная высота поверхности монотонно снижается с уменьшением расстояния расфокусировки при положительном знаке и с увеличением расстояния при отрицательном [6]. При отрицательной расфокусировке значения максимальной высоты поверхности ниже, чем при положительной. Это связано с тем, что при отрицательной расфокусировке лазерный луч сужается, обеспечивая более локальное воздействие и меньшее разбрызгивание.

Выявлены три вида металлических брызг на боковых стенках: I – нерасплавленные частицы в межслоевой области (размер менее 63 мкм); II – беспорядочно расположенные приплавленные порошинки (размер сопоставим с частицами порошка);

III – агломерации множества брызг (наибольший размер). Механизм образования: частицы порошка захватываются задней нижней зоной ванны расплава, где температура колеблется вокруг точки плавления, происходит частичное оплавление и слипание. При многослойной наплавке боковые брызги многократно облучаются лазером, на них образуются микрованны расплава, куда попадают новые частицы, что приводит к росту агломераций (тип III). Наиболее существенное ухудшение качества боковых стенок вызывают агломерации типа III.

Практическая значимость: результаты позволяют настраивать величину расфокусировки лазера для достижения компромисса между качеством верхней поверхности (лучше при положительной расфокусировке) и боковых стенок (лучше при отрицательной). Для большинства применений целесообразно использовать положительную расфокусировку для обеспечения стабильности высоты и припуска на механическую обработку, а затем применять финишную обработку поверхностей.

Список литературы

1. Хаймович А.И., Злобин Е.П., Балякин А.В., Мешков А.А. Влияние погрешностей заготовок прямого лазерного выращивания на точность механической постобработки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2025. – № 12.
2. Haley J.C., Zheng B.L., Bertoli U.S. et al. Working distance passive stability in laser directed energy deposition additive manufacturing // Mater. Des. – 2019. – Vol. 161. – P. 86–94.
3. Хаймович, А.И. Анализ влияния угловых параметров на геометрическую точность и качество поверхности при прямом лазерном выращивании: экспериментальные исследования и моделирование / А.И. Хаймович, Е.П. Злобин, А.В. Балякин // СТИН. – 2025. – № 12. – С. 5-11. – EDN RXHNND.
4. Zhu G.X., Li D.C., Zhang A.F. et al. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition // Opt. Laser Technol. 2012. Vol. 44. P. 349–356.
5. Tan H., Shang W.X., Zhang F.Y. et al. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition // J. Mater. Process. Technol. – 2018. – Vol. 254. – P. 361–372.
6. Wu C.C., Zafar M.Q., Zhao H. et al. Multi-physics modeling of side roughness generation mechanisms in powder bed fusion // Addit. Manuf. – 2021. – Vol. 47.

Сведения об авторах

Балякин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский университет; область научных интересов: аддитивные технологии, лазерная обработка, CAD/CAM.

Скуратов Дмитрий Леонидович – доктор технических наук, профессор; научные интересы: технология машиностроения, аддитивное производство.

Хаймович Александр Исаакович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий производства двигателей, Самарский университет; научные интересы: лазерные технологии, обработка металлов давлением.

Смелов Виталий Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент, директор института двигателей и энергетических установок, Самарский университет; научные интересы: аддитивные технологии, цифровое производство.

Злобин Евгений Петрович – аспирант кафедры технологий производства двигателей, Самарский университет; научные интересы: прямое лазерное выращивание, качество поверхности.

STABILITY OF THE DIRECT ENERGY DEPOSITION PROCESS

Balyakin A.V.¹, Skuratov D.L.¹, Khaymovich A.I.¹, Smelov V.G.¹, Zlobin E.P.¹
Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara,
balaykinav@ssau.ru

Keywords: direct energy deposition, laser defocusing, surface topography, weld height deviation, weld height instability, maximum surface height, metal spatters.

The paper investigates the effect of laser defocusing value on the surface topography of workpieces produced by direct energy deposition (DED). Parameters for assessing the top surface (height deviation and instability) and side walls (maximum height) are proposed. Experiments on nickel superalloy EP648 show that positive defocusing provides better height stability and self-stabilization of the process, while negative defocusing improves side wall quality. Three types of metal spatters are identified, and their formation mechanisms are revealed. The results can be used for dynamic adjustment of defocusing to improve surface quality in DED.