

УДК 621.9

Обработка аддитивно произведенных металлических материалов лазерными импульсами сложной временной формы

Шепелев Александр Евгеньевич	ae_shepelev@mail.ru SPIN-код: 3818-6334
Солохин Сергей Александрович	solokhin@gmail.com SPIN-код: 3351-4194
Шилов Игорь Вячеславович	shilov@dksta.ru
Ершков Михаил Николаевич	ershkov@dksta.ru SPIN-код: 4723-5878

Ковровская государственная технологическая академия имени Дегтярева, Ковров, Россия

Аннотация. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования эффективности обработки аддитивно произведенного материала лазерными импульсами обычной и сложной временной формы. Отличительной особенностью такого материала от материала, полученного традиционными технологиями, является наличие пористости, что учитывалось при моделировании. Импульс сложной временной формы формировался путем комбинации длинного импульса высокой энергии и короткого импульса-пика высокой интенсивности. Теоретически показано, что воздействие на исследуемый материал лазерным импульсом сложной временной формы интенсифицирует рост давления паров отдачи, что способствует повышению скорости лазерной обработки. Выполнены экспериментальные исследования эффективности обработки аддитивного материала лазерными импульсами обычной и сложной временной формы. Результаты экспериментов согласуются с результатами моделирования.

Ключевые слова: аддитивный материал, лазерная обработка, лазерный импульс, временная форма, длинный импульс, импульс-пик

Processing of additively manufactured materials with laser pulses of complex temporal shape

Shepelev Aleksandr Evgenievich	ae_shepelev@mail.ru SPIN-code: 3818-6334
Solokhin Sergey Aleksandrovich	solokhin@gmail.com SPIN-code: 3351-4194
Shilov Igor Vyacheslavovich	shilov@dksta.ru
Ershkov Mikhail Nikolaevich	ershkov@dksta.ru SPIN-code: 4723-5878

FSBEI of HE KSTA named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia

Abstract. Theoretical and experimental studies of the efficiency of processing additively produced material with laser pulses of conventional and complex time shapes have been carried out. A distinctive feature of such material from the material obtained by traditional

technologies is the presence of porosity, which was taken into account during modeling. A complex time-shaped pulse was formed by combining a long high-energy pulse and a short high-intensity spike pulse. It has been theoretically shown that the effect of a complex-time-shape laser pulse on the material under study intensifies the growth of the recoil vapor pressure, which contributes to an increase in the speed of laser processing. Experimental studies have been conducted on the efficiency of processing additive material with laser pulses of conventional and complex-time-shape. The results of the experiments are consistent with the results of the modeling.

Keywords: *additive material, laser processing, laser pulse, temporary shape, long pulse, peak pulse*

Введение. Несмотря на интенсивное развитие аддитивных технологий, очень часто компоненты деталей, изготовленных методами аддитивного производства, нуждаются в постобработке. В основном это связано с высокой шероховатостью поверхности получаемых изделий, а также с наличием многочисленных пор и остаточного материала. В последнее время для постобработки аддитивных материалов успешно применяется лазерная постобработка, с помощью которой выполняются различные технологические операции финишной обработки деталей. Например, наклеп, полировка, лазерное ударное термоупрочнение [1, 2]. Однако проблема повышения эффективности лазерной обработки аддитивно произведенных материалов по-прежнему остается актуальной.

В данной работе для повышения эффективности процесса обработки аддитивных материалов предложено использовать лазерные импульсы сложной временной формы, представляющие собой комбинацию длинного импульса высокой энергии и короткого импульса-пика высокой интенсивности. Предлагаемый подход, основанный на комбинации различных генерационных режимов воздействующего излучения, позволяет повысить эффективность удаления материала из зоны лазерного воздействия. Что является необходимым для повышения эффективности и производительности обработки.

Материалы и методы. В работе выполнено моделирование процесса воздействия лазерных импульсов обычной и сложной временной формы на стальную пластину (толщина 1 мм), изготовленную методом селективного лазерного плавления. В поверхностном слое (глубиной ~100 мкм) исследуемого материала присутствуют сложно сообщающиеся поры со средним размером от 15 до 150 мкм. При этом с увеличением толщины поверхностного слоя материала его пористость изменяется по закону:

$$\Phi(z) = \Phi_0 \times \left[1 - \left(\frac{z}{z_{\max}} \right)^2 \right],$$

где Φ_0 — пористость на поверхности материала; $z_{\max} = 100$ мкм — толщина пористого слоя материала.

Для повышения эффективности лазерной обработки металлов, полученных методами аддитивного производства, в работе предлагается применение

лазерных импульсов со специальным временным распределением энергии. Реализация данного решения основывается на перераспределении энергии по временному профилю лазерного импульса с сохранением его суммарной энергии и общей длительности.

Тепловые процессы, возникающие в аддитивном материале под воздействием лазерного излучения, описываются уравнением теплопроводности [3], в котором дополнительно учитывается зависимость теплопроводности от пористости материала. При наличии сложно сообщающихся пор данная зависимость описывается выражением [4]:

$$\lambda_T(\Phi) = \lambda_1 \times (1 - \Phi)^3,$$

где λ_1 — теплопроводность материала при пористости $\Phi = 0$.

Для исследования процесса воздействия лазерного импульса миллисекундной длительности на поверхность листового стального образца (толщина 1 мм), изготовленного методом селективного лазерного плавления, уравнение теплопроводности решалось методом дробных шагов по времени с помощью неявной конечно-разностной схемы. При этом учитывались начальные условия

$$T_0(z = 0) = 300 \text{ K}; T_0(z = l) = 300 \text{ K}$$

и граничные условия 2-го рода.

При расчете учитывались следующие параметры воздействующего излучения: энергия и длительность импульса 1,2 Дж и 3 мс соответственно, диаметр пучка на облучаемой поверхности материала 0,028 см.

Предварительно были определены оптимальные параметры лазерного импульса сложной временной формы: энергия длинного импульса 1 Дж, энергия импульса-пика 0,2 Дж, задержка генерации импульса-пика относительно переднего фронта длинного импульса 2,5 мс.

Результаты расчетов показали, что в результате облучения материала импульсом обычной и сложной временной формы температура поверхности достигает значения, превышающего температуру кипения (3133 К) материала. Воздействие импульса обычной временной формы обеспечивает нагрев поверхности до температуры 3370 К. При воздействии импульса сложной временной формы поверхность разогревается до температуры 3748 К.

При нагреве материала до температуры кипения удаление расплава осуществляется преимущественно за счет испарения. Процесс испарения материала сопровождается возникновением давления паров отдачи, действие которого также приводит к удалению расплава из зоны лазерного воздействия. В бесстолкновительном приближении давление отдачи паров определяется как половина давления насыщенных паров [5]:

$$P(T_s) = 0,5 \times 10^5 \times \exp\left[\frac{Lb}{Ru} \times \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_s}\right)\right],$$

где Lb — удельная теплота испарения материала; T_v — температура кипения материала; Ru — универсальная газовая постоянная.

Наибольшая эффективность удаления расплава под действием давления отдачи паров обеспечивается в режиме выплеска, реализуемом при выполнении условия [6]:

$$P(T_s) > P_c = \frac{\sigma(T)}{r_{ms}},$$

где P_c — капиллярное давление; r_{ms} — средний радиус кривизны поверхности расплава; $\sigma(T)$ — поверхностное натяжение расплава, зависящее от температуры.

Результаты моделирования позволили установить, что в момент окончания действия лазерного импульса давление отдачи паров достигает значения $1,3 \times 10^5$ Па, что в 11,5 раз превышает сформированное к этому времени капиллярное давление $1,13 \times 10^4$ Па. Давление отдачи паров в момент окончания действия лазерного импульса сложной временной формы составляет $4,3 \times 10^5$ Па и в 39 раз превышает достигнутое к этому времени капиллярное давление $1,1 \times 10^4$ Па.

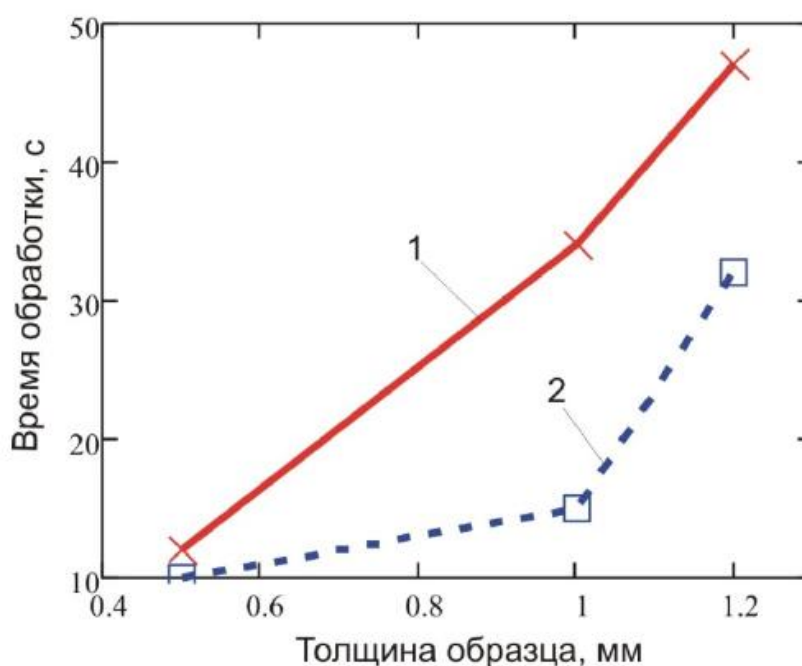
Таким образом, воздействие на исследуемый аддитивно полученный материал лазерного импульса сложной временной формы значительно повышает эффективность удаления расплава в режиме выплеска по сравнению с воздействием импульса обычной формы аналогичной энергии.

В работе дополнительно были проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности скоростного сверления отверстий малого диаметра лазерными импульсами обычной и сложной временной формы в стальных образцах толщиной 0,5, 1, 1,2, изготовленных методом селективного лазерного плавления.

В качестве источника излучения использовался твердотельный YAG:Nd³⁺-лазер с ламповой накачкой. Излучатель лазера представлял собой плоскопараллельный линейный резонатор с двумя последовательно установленными квантронами ТД2.424.005, содержащими активные элементы размером $\varnothing 6,3 \times 90$ мм. Для накачки использовались два блока питания, формирующие импульсы накачки различной длительности. Реализованная между блоками питания ламп накачки линия временной задержки обеспечивала генерацию лазерных импульсов сложной временной формы. При работе каждого блока питания в отдельности осуществлялась генерация лазерных импульсов классической временной формы.

Для обработки экспериментальных образцов использовались лазерные импульсы с энергией 1,2 Дж, длительностью 3 мс и частотой следования 12 Гц. В импульсах сложной формы энергия длинного импульса составляла 1 Дж, энергия короткого импульса — 0,2 Дж, частота следования также 12 Гц. Диаметр пучка воздействующего лазерного излучения — 280 мкм.

Результаты и их обсуждение. Зависимости времени сверления сквозных отверстий лазерными импульсами обычной и сложной временной формы от толщины обрабатываемых образцов представлены на рисунке.



Зависимости времени сверления сквозных отверстий лазерными импульсами обычной (1) и сложной (2) временной формы от толщины обрабатываемых образцов

Результаты, представленные на рисунке, показывают, что воздействие импульсами сложной временной формы позволяет сократить время сверления отверстия в образце толщиной 0,5 мм в 1,2 раза, в образце толщиной 1 мм — в 2,3 раза, в образце толщиной 1,2 мм — в 1,5 раза.

Заключение. В работе предложен способ повышения эффективности лазерной постобработки аддитивно произведенных металлических материалов, заключающийся в применении лазерных импульсов сложной временной формы. По результатам проведенного математического моделирования установлено, что использование импульсов сложной временной формы позволяет реализовать механизм плавления материала и интенсифицировать удаление расплава в режиме выплеска за счет многократного превышения давления отдачи паров над капиллярным давлением. Экспериментально установлено, что обработка импульсами сложной временной формы аддитивно произведенных стальных образцов толщиной 0,5–1,2 мм позволяет сократить время сверления сквозных отверстий в 1,2–2,3 раза по сравнению с воздействием импульсами обычной временной формы аналогичной энергии.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 25-29-20294.*

Список источников

- [1] Peng X., Kong L., Fuh J.Y.H., Wang H.A Review of post-processing technologies in additive manufacturing. *J. Manuf. Mater. Process*, 2021, no. 5. [https:// doi.org/10.3390/jmmp5020038](https://doi.org/10.3390/jmmp5020038)
- [2] Ali M., Almotari A., Algamal A. and Qattawi A. Recent advancements in post processing of additively manufactured metals using laser polishing. *J. Manuf. Mater. Process*, 2023, no. 7 (115). <https://doi.org/10.3390/jmmp7030115>
- [3] Чермошенцева А.А., Плотникова И.С., Карноушенко М.О. Особенности реализации численных схем решения двумерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах. *Вестник Камчатского государственного технического университета*, 2011, вып. 17, с. 79–83.
- [4] Montes J.M., Guevas F.G., Cintas J., Ternero F. Porosity effect on the thermal conductivity of sintered powder materials. *Applied Physics A*, 2025, vol. 131, art. no. 149, pp. 131–149. <https://doi.org/10.1007/s00339-025-08254-y>
- [5] Ковалева И.О., Ковалев О.Б. О влиянии давления отдачи при испарении на движение частиц порошка в световом поле при лазерной наплавке. *Прикладная механика и техническая физика*, 2012, № 1, с. 67–79.
- [6] Левин Ю.Ю. *Исследование и разработка технологического процесса импульсной лазерной сварки тонкостенных алюминиевых конструкций*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2008, 24 с.

