

техники: справочник / под общ. ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение. 1990. – 448 с.

10. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / под ред. А.М. Дальского и др. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

11. **Tumbleston J.R. and others.** Continuous liquid interface production of 3D objects / *Science*. 2015, 347. 1349.

12. **Бойцов А.Г., Моргун Ю.А., Саушкин Б.П.** Состояние и перспективы подготовки инженерных и научных кадров в области наукоемкого машиностроения // *Экономические стратегии*. 2015. № 4. – С. 12 – 19.

REFERENCES

1. Industry, science and education – ways of development and results expected / *All-Russian Discussion*. – М.: Soyuzmash of Russia, 2007. – pp. 70.

2. Grigoriev S.N., Smurov I.Yu. Trends of innovation additive production development in Russia and abroad // *Innovations*. 2013. №10. – pp. 76 – 82.

3. Sirotkin O.S. Current state and outlooks of additive techniques development // *Aircraft Industry*. 2015. №2. – pp. 22–25.

4. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.M. *Additive Techniques in Mechanical Engineering*. – S.-Pb.: Publishing House of S.-Pb. Polytechnic University. 2013. – pp. 222.

5. *High Technologies in Mechanical Engineering. Physical – Chemical Methods and Techniques* / under the editorship of B.P. Saushkin. – М.: Forum. 2013. – pp. 920.

6. Metal processing: high-technology cutters or additive techniques? // *Photonics*. 2015. №3. – pp. 36 – 39.

7. Bourneaud F., Desagulier Ch. From satellite to launcher, highlights on powder/wire ALM at Astrium Space Transportation/ Proc. 12th Conference on Space Structures, Materials and Environmental Testing / Noordwijk, The Netherlands, 2012 (ESA SP-691, July 2012).

8. Volosova M.A., Okunkova A.A. Optimization ways of selective laser agglomeration processes by choice of processing strategy with laser beam // *Proceedings of Samara Scientific Center of RAS*. 2012. №4. Vol. 14. – pp. 587–591.

9. *Computations of New Technics Cost-Effectiveness: Directory* / under the general editorship of K.M. Velikanov. – Л.: Mechanical Engineering. 1990. – pp. 448.

10. *Technologist-Mechanician Directory*. In 2 Vol. Vol.2 / under the editorship of A.M. Dalsky et al. – М.: Mechanical Engineering-1, 2003. – pp. 944.

11. Tumbleston J.R. and others. Continuous liquid interface production of 3D objects / *Science*. 2015, 347. 1349.

12. Boitsov A.G., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. State and outlooks of engineering and scientific staff training in the field of high tech mechanical engineering // *Economic Strategies*. 2015. № 4. – pp. 12 – 19.

Рецензент д.т.н. И.И. Артёмов

УДК 681.7.069.24: 621.81-023.5
DOI: 10.12737/20598

В.В. Порошин, д.т.н.
(АНО «Институт Развития Новых Образовательных Технологий»),
А.В. Богданов, к.т.н.
(МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва),
И.А. Зябрев, аспирант
(АНО «Институт Развития Новых Образовательных Технологий») E-mail: vporoshin@mail.ru

Разработка способа аддитивного технологического процесса газопорошковой лазерной наплавки

Предложен способ лазерного послойного спекания частиц порошка со сканированием лазерного излучения по различным траекториям. Рассмотрено влияние траектории сканирования и скорости обработки на геометрические характеристики наплавленных слоёв.

Ключевые слова: лазер; наплавка; порошок; сканатор; дозатор; слой.

V.V. Poroshin, D.Eng.,
(ANO “Institute of New Educational Techniques Development”)
A.V. Bogdanov, Can.Eng.,
(Bauman STU of Moscow, Moscow)
I.A. Zyabrev, Post graduate student
(ANO “Institute of New Educational Techniques Development”)

Development of additive technological method for gas-powder laser surfacing process

The methods of additive techniques of layer-by-layer laser agglomeration of powder materials at a direct injection and mechanical powder feed are considered. A method for layer-by-layer surfacing with a scanning laser beam is offered. The paths of scanning on a line, ellipse and a circle are analyzed. Samples are processed and investigations on an influence of a processing velocity and the paths of scanning upon geometrical adjectives of layers obtained are carried out. The investigation results obtained allowed drawing a conclusion of the optimality of a scanning path of a laser beam on an ellipse, on geometrical adjectives and a coefficient of powder use.

Keywords: laser; surfacing; powder; scanator; dispenser; layer.

В настоящее время во всем мире проводятся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию технологий и систем послойного лазерного синтеза объемных изделий (ЛСОИ) для различных отраслей промышленности. Такие системы позволяют резко ускорить и удешевить процесс внедрения новой техники на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину [1].

Данные технологические процессы относятся к классу Direct Manufacturing или Additive Manufacturing (аддитивное производство) и представляют собой непосредственное изготовление трехмерных деталей без использования промежуточных операций по обработке заготовок.

Основные преимущества метода послойного лазерного спекания – это возможность в автоматизированном режиме фактически получать трехмерные изделия по их компьютерной модели. При этом сокращается время и затраты на получение изделия, т.к. исключаются промежуточные стадии изготовления оснастки и пресс-форм, отсутствуют дефекты литья и снижается трудоемкость финишной механической обработки [2].

В основе данного процесса используется метод послойного лазерного спекания порошков (LAM – laseradditive manufacturing), предложенного американской компанией AeroMet. Его суть заключается в использовании сканирующего лазерного луча для расплавления порошковых материалов и послойного выплавления детали заданной формы. Для этого применяются два способа подачи порошка в зону плавления: вместе с инертным газом с помощью сопла (рис. 1) и механически из специальной камеры (рис. 2).

Недостатком данных способов и устройств является получение наплавленных слоёв с размерами, ограниченными размером лазерного сфокусированного пятна, отсутствие возможности изменения энерговклада лазерного излучения, высоты наплавленного слоя.

Авторами предложен способ лазерного послойного спекания путём прямого инжектирования частиц порошка, основанный на процессе газопорошковой лазерной наплавки [3], позволяющий осуществлять:

- оптимизацию энерговклада за счет перемещения остро сфокусированного лазерного луча по изменяемым траекториям с регулируемой амплитудой и частотой;

- изменение распределения порошка по траектории сканирования лазерного луча для получения равномерного наплавленного слоя;
- повышение производительности процесса за счет увеличения зоны обработки путем сканирования лазерного излучения.

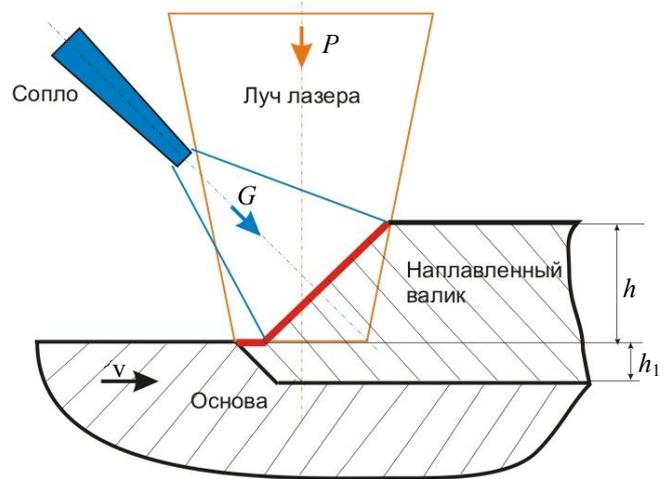


Рис. 1. Схема подачи порошка и инертного газа с помощью бокового сопла

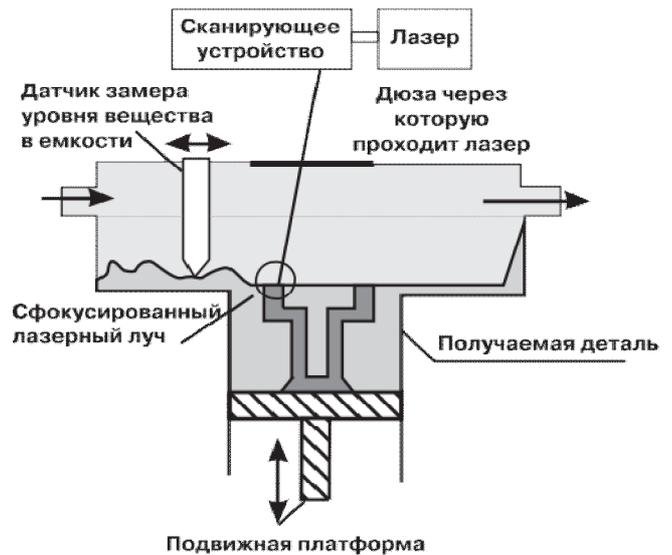


Рис. 2. Схема подачи порошка механически из специальной камеры

Общая схема предложенного способа представлена на рис. 3.

С увеличением частоты с 50 до 150 Гц наблюдается рост высоты наплавки и уменьшение зоны сплавления валика с основным материалом. Скорость перемещения лазерного луча по траектории сканирования изменяется с $v = 1,1$ мм/с и достигает 3,5 мм/с при частоте 150 Гц, что является оптимальной с точки зрения энерговложения. Дальнейшее увеличе-

ние частот 200 и 250 Гц показало снижение высоты валиков, что связано с большой скоростью $v = 4,6...5,9$ мм/с перемещения лазерного луча по траектории сканирования.

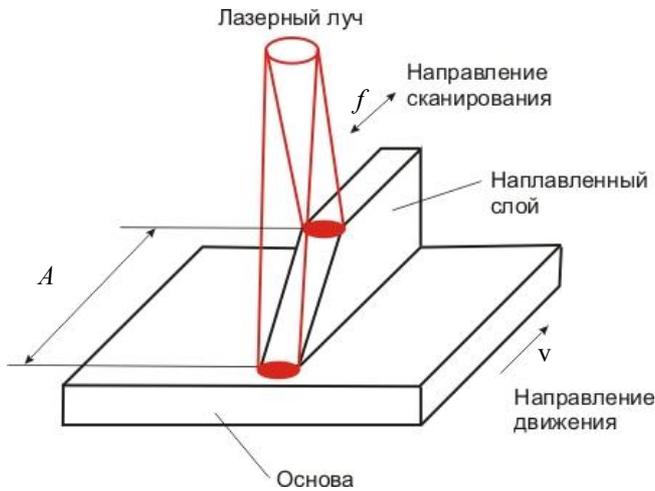


Рис. 3. Общая схема продольного сканирования лазерного луча по прямой

Новизна представленного способа состоит в следующем: сфокусированный лазерный луч сканируется по наплавляемой поверхности по прямой или эллипсной траектории соосно направлению перемещения (рис. 4). В специально разработанное 3-х камерное боковое сопло подаётся газопорошковая смесь от дозирующего устройства, формируя конусный факел газопорошковой струи на выходе. Наплавляемая поверхность располагается вне зоны фокуса факела газопорошковой струи, но в фокусе лазерного луча. Таким образом, лазерный луч на наплавляемой поверхности инициирует ванну расплава, в которую вдувается порошок, порошок плавится, формируя наплавленный валик, в то время, пока воздействует луч.

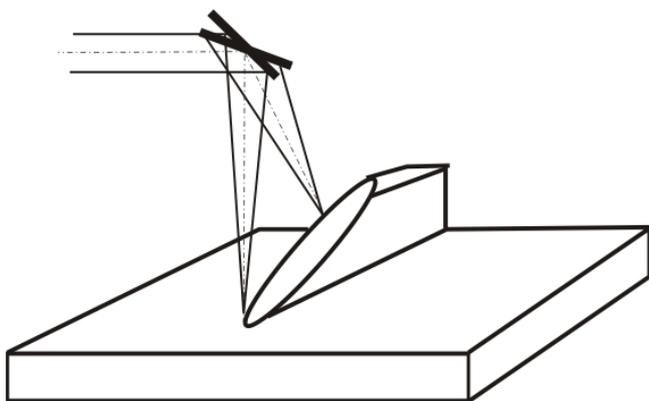


Рис. 4. Схема продольного сканирования по эллипсной траектории

Изменение зазора между внутренней и внешней частью сопла даёт возможность регулировать ширину газопорошкового потока. При использовании двух различных сопел, расположенных соосно направлению движения лазерного луча, возможна подача газопорошковых струй с различными химическими составами порошков, а независимая регулировка расходов порошка позволит изменять долю их участия в общем наплавленном слое (рис. 5).

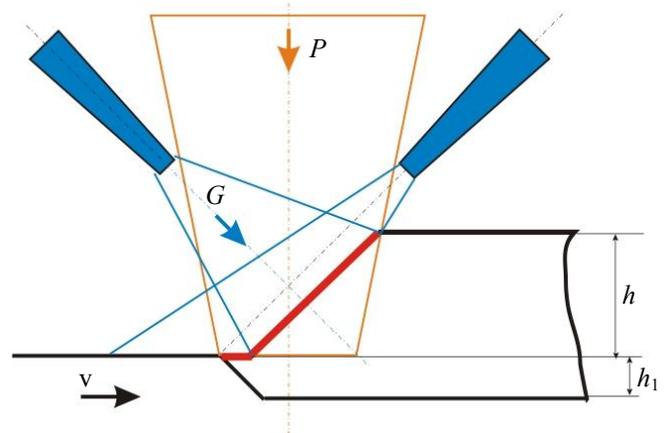


Рис. 5. Схема наплавки с помощью двух газопорошковых сопел

Эксперименты проводились с использованием излучения непрерывного CO_2 -лазера мощностью 2 кВт. В качестве присадочного материала использовался порошок Ni-Cr-B-Si сплава, который подавался в зону наплавки специальным дозирующим устройством. Расход порошка и газа не изменялся. Подложкой служили образцы из стали 45. Скорость перемещения образцов составляла 2...10 мм/с. Лазерный луч, сфокусированный в пятно диаметром 1,0 мм на поверхности, падал на образец вертикально, а порошок подавался из бокового сопла. Фокус газопорошковой струи находился в центре траектории и был заглублён на 5 мм. Сканирование луча производилось специально разработанным устройством по линии, эллипсу и окружности с частотой 150 Гц и амплитудой 8 мм. Частота выбрана по итогам экспериментов, проведенных с целью выявления влияния частоты сканирования лазерного луча на геометрические параметры наплавленных слоёв. Исследовалось сканирование с частотами 50, 100, 150, 200 и 250 Гц (рис. 6).

На частоте 200 Гц, в диапазоне скоростей обработки 5...8 мм/с, уменьшение высоты происходит более плавно, в отличие от режимов с частотами 50...150 Гц.

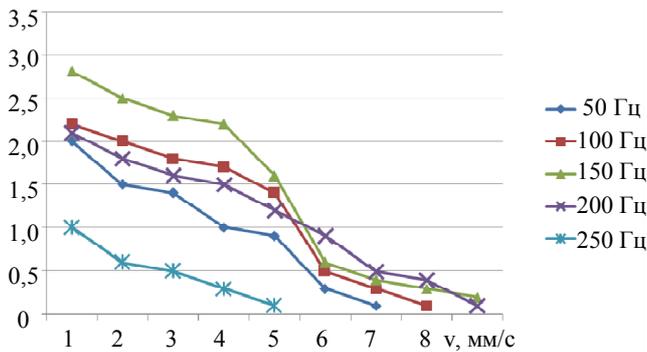


Рис. 6. Зависимость высоты наплавленного слоя h от скорости v и частоты сканирования

Обработка результатов эксперимента позволила сделать вывод об оптимальной частоте 150 Гц, при получении наибольшего по высоте качественного наплавленного слоя.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 7 показывают, что при обработке со сканированием лазерного луча по линии, слой имеет стабильную форму до 5 мм/с, далее идет резкое падение толщины слоя, что объясняется недостатком энергии лазерного луча на расплавление присадочного материала. Высота наплавки максимальна, но ширина валика ограничена размерами лазерного пучка.

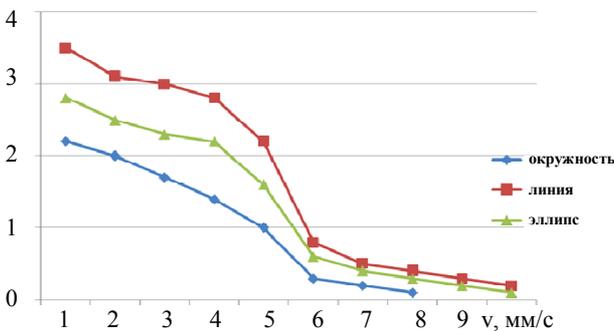


Рис. 7. Зависимость высоты наплавленного слоя h от скорости v и траектории сканирования

При наплавке со сканированием по окружности высота образовавшегося слоя также снижается с увеличением скорости обработки. Это объясняется тем, что длина траектории сканирования лазерного луча по окружности больше длины траектории при сканировании по линии в 3,14 раза, а следовательно и энергозатрат в зоне обработки меньше.

Наилучшие результаты были получены со сканированием лазерного луча по эллипсной траектории, стабильный слой наблюдался при скорости обработки 2...4 мм/с, что объясняется оптимальной вложенной энергией по траектории сканирования. Следует заметить, что при скорости обработки 1,0 мм/с хотя и на-

блюдался рост высоты наплавленного слоя, но был замечен явный перегрев основного материала.

Наибольшая ширина слоя была получена при сканировании по окружности, что определялось шириной траектории.

Анализ полученных данных, исследование наплавленных слоёв образцов дали возможность сделать вывод о том, что коэффициент использования порошка (Кип) максимален при наплавке со сканированием лазерного луча по эллипсной траектории и доходит до 86 %. При линейной траектории Кип составляет 57 %, при окружности – 64 %.

Учитывая особенности применения лазеров в промышленности в целом [4] и успешное внедрение волоконных лазеров в частности [5], целесообразно опробовать разработанную технологию и оборудование применительно к ним.

Выводы

1. Оптимальной частотой сканирования, с «энергетической» точки зрения является 150 Гц.
2. Оптимальной траекторией сканирования сфокусированного лазерного луча с точки зрения геометрических характеристик и качества наплавленного слоя является эллипс.
3. При сканировании по эллипсной траектории коэффициент использования порошка доходит до 86 %.
4. Инжектирование порошкового материала производится соплом в зоне расфокусировки газопорошкового потока в соответствие с траекторией сканирования.
5. При использовании двух различных боковых сопел, расположенных соосно направлению движения лазерного луча, возможна подача газопорошковых струй с различными химическими составами порошков, а независимая регулировка расходов порошка позволит изменять высоту наплавленных слоев и долю их участия в общем наплавленном слое.

Таким образом, использование способа лазерного послойного спекания путём прямого инжектирования частиц порошка со сканированием луча позволит увеличить производительность процесса при сохранении всех преимуществ лазерной технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишковский, И.В., Щербаков, В.И., Петров, Л.А. Лазерный синтез огнеупорной керамики из порошков Al и CrO₂ // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 3. – С. 45–48.
2. Федотов, А.В. Новые технологии производства аэрокосмических материалов и сплавов // РИТМ. – 2011. – №5. – С. 32–35.

3. Шляпин, А.Д., Порошин, В.В., Зябрев, И.А. Лазерная наплавка со сканированием излучения / Сб. науч. тр. Евразийский союз ученых. Междунар. научно-практическая конф. «Современные концепции научных исследований». Ч. 2, – 2015. – №6(15). – С. 89–91.

4. Богданов, А.В. Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров // Технология машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 34–36.

5. Богданов, А.В., Грезев, Н.В., Шмелев, С.А. Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 6 (48). – С. 30–4.

REFERENCES

1. Shishkovsky, I.V., Shcherbakov, V.I., Petrov, L.A. Laser synthesis of refractory ceramics of Al and CrO₂ powders //

Physics and Chemistry of Material Processing. – 2001. – № 3. – pp. 45–48.

2. Fedotov, A.V. *New Techniques of Aerospace Material and Alloy Manufacturing* // RITM. – 2011. – №5. – pp. 32–35.

3. Shlyapin, A.D., Poroshin, V.V., Zybrev, I.A. Laser surfacing with radiation scanning / *Proceedings of Eurasian Union of Scientists. Inter. Scient.-Pract. Conf. "Modern Concepts in Scientific Researches"*. Part 2, – 2015. – №6(15). – pp. 89–91.

4. Bogdanov, A.V. Estimate peculiarities of engineering laser technological potentialities // *Engineering Techniques*. – 2011. – № 11. – pp. 34–36.

5. Bogdanov, A.V., Grezev, N.V., Shmelev, S.A. Fiber laser application for increase of wear resistance and contact fatigue of railway wheels // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 6 (48). – pp. 30–4.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

УДК 621.9.529

DOI: 10.12737/20599

С.В. Курынцев, к.э.н.,

К.Ю. Нагулин, к.ф.-м.н.,

А.И. Горунов, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

420111, Россия, г. Казань, ул. К.Маркса, 10)

E-mail: kuryntsev16@mail.ru

Аддитивные технологии – третья индустриальная революция*

Представлен обзор отечественной и зарубежной литературы на тему аддитивные технологии – третья индустриальная революция. Подробно рассмотрены два основных метода аддитивных технологий: технология послойного спекания или плавления, технология на основе металлической наплавки.

Ключевые слова: аддитивные технологии; 3D-принтинг; спекание; плавление; лазерный луч; электронный луч; наплавка.

S.V. Kuryntsev, Can.Eng.,

K.Yu. Nagulin, Can. Ph-Math.,

A.I. Gorunov, Can.Eng.

(FSBEI HE "Tupolev National Research Technical University of Kazan –KAI"

10, K Marx Str., Kazan 420111, Russia)

Additive Techniques – the third industrial revolution *

This paper reports two basic methods of additive techniques, a method of layer-by-layer agglomeration or metal powder melting and a method based on metal surfacing technique. A thorough description of the routine methods of additive techniques their advantages and disadvantages, a product range and field of product application are presented. Basic problems arising at the use of additive techniques and produce manufactured such as the certification of initial material, technology certification, production process control in its development, test procedure of parts manufactured are touched upon. The peculiarities of behavior of blanks obtained through additive techniques at further technological operations, for example, at laser welding are described. Basic trends in researches carried out by leading scientists in the field mentioned are emphasized.

Keywords: additive techniques; 3D printing; agglomeration; melting; laser beam; electronic beam; surfacing.

В 21 веке в постиндустриальных странах традиционное субтрактивное производство,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации Грант РФФИ ОФИ-М №14-29-10281.

основанное на удалении исходного материала (резание и пр.), уже не справляется с неуклонно усложняющимися технологическими требованиями, особенно в случае сложноконфигурированных конструкций и изделий из ком-