

Моделирование тепло и массопереноса в лазерно-плазменном методе прямого наращивания микропорошков

*Д.В. Беденко**, *О.Б. Ковалев*

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

**dmtr.bedenko@gmail.com*

Аннотация. Для метода прямой лазерно-плазменной порошковой наплавки численно исследуются температурные профили и формы поверхности наплавляемых слоев стального микропорошка на поверхность плоского образца для различных стратегий сканирования лазерной системы, – с осцилляциями по синусоидальной кривой, циклически замкнутым траекториям в форме окружности или восьмерки. Решение задачи проводится на основе моделирования тепло- и массообменных процессов, происходящих при газоструйной подаче частиц порошка в ванну расплава, создаваемую при лазерно-плазменном воздействии. Выявлены эффективные траектории и частоты циклических движений лазерного луча, при которых количество нанесенного порошка максимально, а получающиеся валики имеют гладкую симметричную форму. Показано, что это происходит вследствие гибкого и точного управления размерами и формой ванны расплава, когда она лучше всего соответствует профилю потока частиц порошка. В результате модель позволяет определить оптимальные режимы лазерно-плазменной наплавки с наибольшим коэффициентом использования порошка и отсутствием излишнего перегрева подложки.

Ключевые слова: наплавка порошка, тепло и массообмен, циклическое сканирование, лазерно-плазменный метод.

1. Введение

Лазерно-плазменная наплавка отличается от традиционного метода прямого наращивания микропорошков с помощью CO₂-лазера появлением пульсирующего оптического разряда в импульсно-периодическом режиме воздействия излучения. При высокой интенсивности лазерного излучения в импульсе, например, для железа это около 10 МВт/см², происходит активное испарение металла и затем оптический пробой с образованием приповерхностной лазерной плазмы [1]. Ранее подобный подход осуществлен экспериментально авторами [2], где отмечается многократное увеличение эффективности энергообмена между плазмой и металлом по сравнению с прямым поглощением лазерного луча без зажигания плазмы. Поглощение микроволнового излучения благородными металлами в инфракрасном диапазоне длин волн, а для CO₂ это 10.4 мкм, является очень низким (например, для алюминия около 6% при температуре кипения). Появление оптического разряда приводит к значительному увеличению подвода энергии от лазера к мишени посредством плазмы, которая благодаря высокой доле излучения оптического и ультрафиолетового диапазонов обеспечивает более эффективное поглощение [3]. С другой стороны, применение излучения высокой интенсивности может привести к излишнему перегреву материала мишени, поэтому необходимо быстро перемещать лазерный луч по ее поверхности. В последнее время появились работы [4, 5], направленные на изучение влияния быстрого циклического перемещения лазерного луча по сложной траектории для улучшения эффективности наплавки. В работе [4] рассмотрен аналитический подход к расчету профиля температур и формы ванны расплава при смещении по спирали вдоль одной из координат без учета наплавки частиц порошка. В результате авторами показана возможность получения единой симметричной формы жидкой ванны. Это имеет большое значение для метода прямого наращивания микропорошков, т.к. твердые частицы, не попадая в расплав, отражаются от поверхности, что приводит к значительному снижению количества наплавляемого порошка и сильно уменьшает эффективность процесса.

В настоящей работе главной целью являлось определение таких траекторий и частот движения лазерного луча, а также ряда других режимных параметров процесса, чтобы форма и размер расплавленного металла полностью соответствовали форме распределения потока частиц. Моделированием фокусировки порошковых течений коаксиальными соплами применительно к методу прямого лазерного наращивания авторы занимались ранее [6]. Наличие плазмы, возникающей при каждом лазерном импульсе, учитывалось исходя из ранее проведенных расчетов по изменению коэффициента передачи энергии от лазерного луча в мишень сквозь плазменное облако [7].

2. Математическая модель

Рассмотреть описанную ранее задачу предлагается на основе тепло и массообменных процессов, происходящих при наращивании порошка на плоскую подложку в виде одного или нескольких слоев/валиков. Общая схема процесса комбинированной лазерно-плазменной наплавки представлена на Рис. 1 и состоит из сканирующего по поверхности подложки лазерного луча, и потока частиц порошка, который захватывает сразу всю амплитуду циклического движения. В классической лазерной наплавке излучение и частицы перемешаются в одну область, в то время как в комбинированном методе необходимо двигать лазерный луч гораздо быстрее, избегая перегрева и прожигания поверхности из-за очень высокой интенсивности излучения, необходимой для организации оптического пробоя. Частота синусоидальных или круговых перемещений луча может составлять десятки или даже сотни герц, в таком случае менять траектории движения частиц в газе просто невозможно.

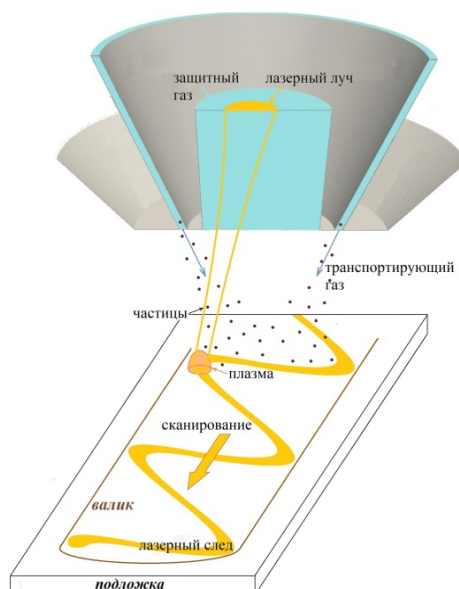


Рис. 1. Схема проведения лазерно-плазменной наплавки порошка по синусоидальной траектории сканирования луча. На схеме газодинамическая доставка и фокусировка порошка осуществляется двойным коаксиальным соплом.

В рамках поставленной задачи в модели могут быть приняты следующие упрощающие предположения:

1. Рассматриваются только тепло и массообменные процессы в области с подвижными криволинейными границами, где в роли источника энергии выступает суммарное излучение

из лазера и плазмы, учитывая энтальпию частиц, а также поток массы согласно известной функции распределения плотности потока порошка (определено в [6]).

2. Нарастивание поверхности валика происходит в результате попадания частиц порошка в жидкий расплав, и определяется согласно уравнению кинематической совместности точек без учета гидродинамических течений в ванне расплава. Это допустимо, потому что источник излучения быстро перемещается по поверхности и глубокой ванны расплава не формируется. Кроме того, вследствие большого избыточного давления в момент образования плазмы на поверхности ванны расплава существует лишь жидкая пленка.

3. Оценка изменения передачи энергии от лазерного луча к подложке оценивалась ранее в [7] и учитывается в обобщенном коэффициенте поглощения излучения. Близкие результаты, но полученные уже экспериментально, приводятся в [2].

4. Учитывая размер частиц в 20–100 мкм, расход порошка порядка 5 г/мин и диаметр порошкового пятна в 3 мм, можно оценить их количество, как более 10^4 штук падающих на 1 мм^2 за секунду. Поэтому допустимо считать, что функция их распределения имеет гладкий непрерывный вид. В [6] было показано, что для коаксиального сопла распределение имеет вид близкий к нормальному: $m_p(x,y) = 2F_p/(\pi r_p^2) \exp(-2(x^2 + y^2)/r_p^2)$.

В общем виде модель включает в себя уравнение теплопроводности в энтальпийной форме (1) и уравнение кинематической совместности точек для подвижной внешней поверхности валика (2):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T), \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = E_p (\vec{V}_p \cdot \vec{n}_p) / |V_p| \frac{m_p(x,y)}{\rho_p} (1 + S_x^2 + S_y^2)^{1/2}, \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает баланс массы, т.е. эволюцию поверхности наращиваемого слоя в результате падения частиц порошка в ванну расплава ($E_p = 1$), которая рассчитывается из уравнения (1).

Данные уравнения необходимо дополнить уравнением баланса энергии на внешней границе валика:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s = A I_{las}(x,y,z) \cos \gamma - \alpha (T - T_0) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) + \rho V_0 e^{-L_e M/RT} - v_n (H - H_p),$$

где v_n скорость роста поверхности валика по нормали к поверхности, индексы 0 или p относятся к окружающей среде или частицам порошка, соответственно.

3. Результаты и обсуждения

В режиме циклического сканирования лазерного луча с одновременным линейным перемещением наплавочной системы проведено моделирование теплового состояния и формы наращиваемой поверхности в результате наплавки частиц порошка, попадающих в образующуюся под воздействием излучения ванну расплава. На Рис. 2 представлены результаты моделирования для наплавки с круговым (спиральным) движением луча по поверхности образца для разных частот. Размеры пятна теплового воздействия излучения (0.4 мм) заметно меньше радиуса разлета частиц (1.5 мм), вследствие чего ширина получающегося слоя (валика) превышает размеры ванны расплава. Видно, что она сильно вытягивается и изгибается по направлению быстрого циклического движения луча. Для частоты в 30 Гц общая длина жидкой ванны кратно превышает ширину, а коэффициент

использования порошка, который определяется как отношение наплавленной массы к общему расходу порошка, составил всего 33%. Расплав занимает только часть ширины валика, и большую часть цикла вытянут вдоль его краев, поэтому наблюдается «двугорбость» поверхности. С ростом циклической частоты ν происходит дальнейшее удлинение и загибание ванны, пока она полностью не смыкается, образуя единую круглую форму. В этом случае ее поперечные размеры совпадают с максимальной шириной валика, а коэффициент использования порошка достигает 72.2%. При дальнейшем росте частоты циклических движений луча размеры ванны практически не изменяются, т.е. данная частота является оптимальной для выбранных параметров наплавки. Температура на поверхности валика максимальна в области пятна воздействия излучения и незначительно превышает температуру кипения 3133 К. В остальной части ванны расплава она лишь на 200–300 К превышает температуру плавления (1812 К), т.е. значительного перегрева поверхности не происходит, поэтому такой режим теплового воздействия так же является оптимальным.

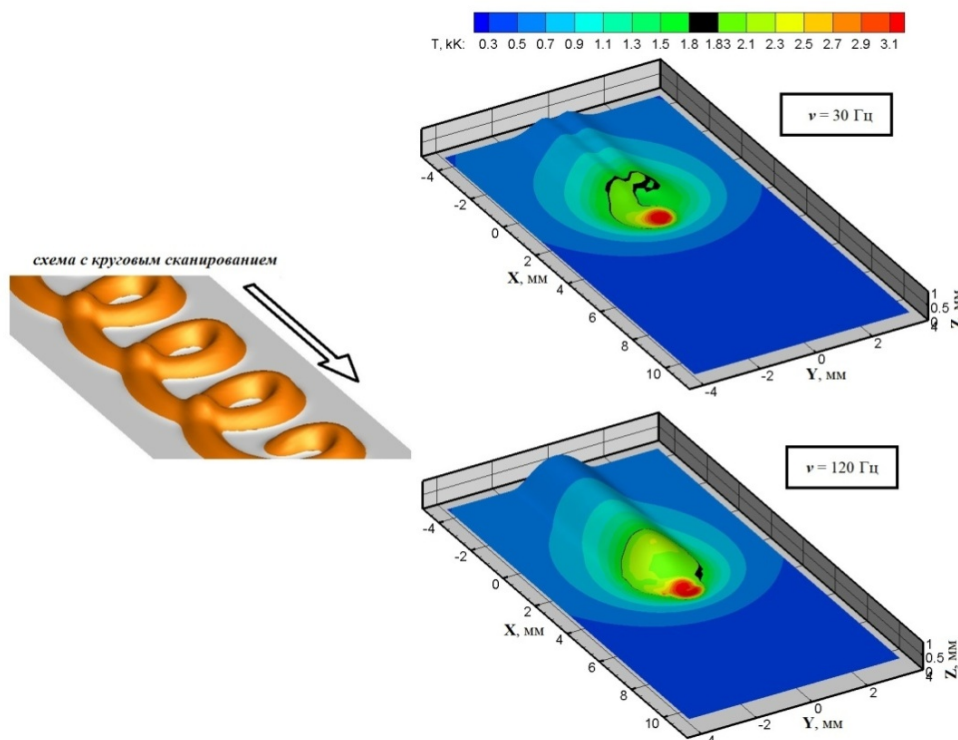


Рис. 2. Расчет наплавки стального валика под действием лазерного излучения мощностью 1.5 кВт в режиме кругового сканирования с разной частотой 30 и 120 Гц. Скорость поступательного движения 200 мм/мин, полная амплитуда осцилляций 2 мм, радиус лазерно-плазменного воздействия 0.4 мм, $F_p = 3$ г/мин.

Далее представлены результаты расчетов для циклического движения лазерного луча по синусоиде и в форме восьмерки, Рис. 3. При синусоидальном движении с ростом частоты происходит удлинение ванны расплава по направлению движения луча, пока ее ширина, как и в предыдущем случае, не приближается к размерам порошкового пятна при той же частоте 120 Гц. Однако, форма ванны расплава имеет сжатый по направлению линейного смещения вид, в результате чего не все частицы порошка могут в нее попасть, поэтому коэффициент использования порошка не превышает 49.7%. Для стратегии сканирования по восьмерке форма жидкой ванны приближается к круглой при частоте 120 Гц, поэтому коэффициент использования порошка повышается до 65.1%. Регулируя в дальнейшем отношение длины

полуосей по координатам X и Y можно добиться еще лучшего соответствия форме порошкового пятна, но данный вариант не имеет преимуществ перед круговой стратегией сканирования.

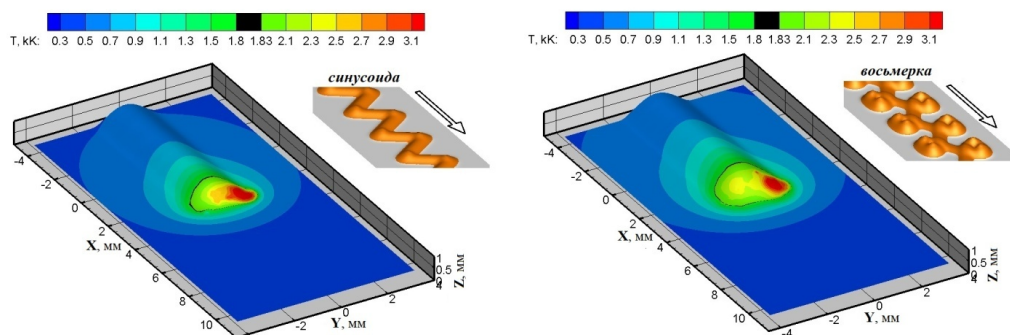


Рис. 3. Расчет наплавки стального валика в режиме сканирования по синусоиде или в форме восьмерки с частотой 120 Гц. Мощность лазера 1.5 кВт, 200 мм/мин, полная амплитуда 2 мм, $F_p = 3$ г/мин.

Обратим внимание, что круговую траекторию движения можно заменить на эллиптическую, меняя длины полуосей или величину сжатия по направлению линейного смещения. Это приведет к удлинению или сжатию ванны расплава с одновременным сохранением ее симметричной округлой формы и максимальной ширины. Данный подход будет актуален при наклоне сопла к плоскости подложки, когда проекция порошкового пятна на нее будет иметь вытянутую (эллиптическую) форму и можно будет точно подобрать под нее размеры жидкой ванны.

При проведении послойного наращивания валиков один поверх предыдущего по круговой стратегии с равномерной функцией $m_p(x,y) = 2F_p/(\pi r_p^2)$ их форма, коэффициент использования порошка и температура заметно не меняются от слоя к слою, Рис. 4. Это объясняется высоким коэффициентом теплопроводности металла, когда тепло от места воздействия излучения быстро отводится вглубь подложки. Наблюдается лишь некоторое увеличение коэффициента использования порошка с 71.7% (2 слой) до 77.6% (3 слой), вследствие постепенного аккумулирования тепла подложкой/стенкой.

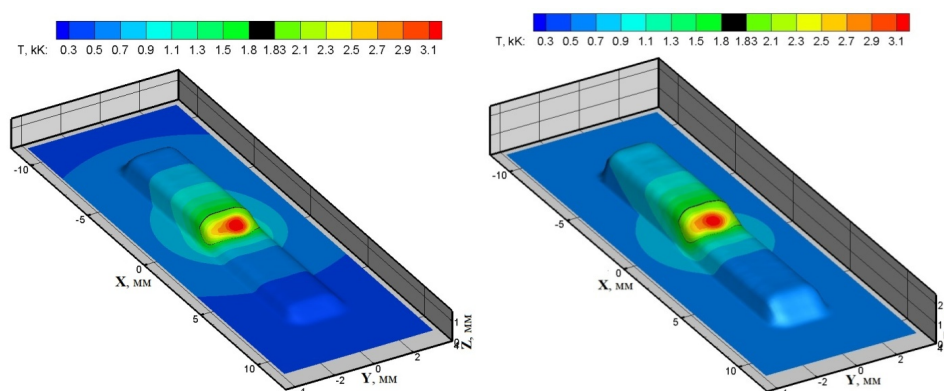


Рис. 4. Расчет послойной наплавки двух и трех стальных валиков послойно при круговой стратегии сканирования с частотой 120 Гц с распределением $m_p(x,y) = \text{const}$.

4. Заключение

В результате проведенных расчетов получены поля температур, размеры и форма наращиваемых слоев при одиночной и послойной наплавке стального порошка под

воздействием лазерно-плазменного излучения в режиме циклического сканирования по различным траекториям, – синусоидальной, круговой и в форме восьмерки с постоянным смещением вдоль одной из осей.

Определено, что оптимальной стратегией сканирования является движение по круговой (эллиптической) траектории с частотой 120 Гц и более, когда образуется круглая симметричная ванна расплава, хорошо совпадающая по размерам с порошковым пятном. Вследствие этого большая часть твердых частиц порошка попадает в расплав и коэффициент его использования максимален (> 70%). При синусоидальной траектории движения или в виде восьмерки при схожих частотах также можно добиться симметричного вида ванны расплава эллиптической формы, однако, уже с меньшей эффективностью наплавки порошка.

При круговой стратегии движения высокие температуры (близкие к температуре кипения) наблюдаются только в пятне теплового воздействия излучения, а в остальной части ванны расплава происходит минимальный перегрев поверхности выше температуры плавления всего на 200–300 К, что является оптимальным с точки зрения минимизации термического воздействия на образец и повышения энергоэффективности процесса.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

5. Список литературы

- [1] A.M. Prokhorov, V.I. Konov, I. Ursu, et al., *Interaction between laser radiation and metals*, Moscow: Nauka, 1988.
- [2] M.N. Khomyakov, P.A. Pinaev, P.A. Statsenko, I.B. Miroshnichenko, and G.N. Grachev, Formation of hardening coatings based on Fe-Cr-Si-B-C alloys with high glass-forming ability by laser-plasma methods, *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) Metal Working and Material Science*, vol. **20**(4), 21, 2018; doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-21–34
- [3] J. Xie, A. Kar, J.A. Rothenflue, and W.P. Latham, Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO₂, Nd:YAG and chemical oxygen-iodine lasers, *Journal of Laser Applications*, vol. **9**, 77, 1997; doi: 10.2351/1.4745447
- [4] P.R. Zagade, B.P. Gautham, A. De, and T. DebRoy, Analytical modeling of scanning strategy effect on temperature field and melt track dimensions in laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, vol. **82**, 104046, 2024; doi: 10.1016/j.addma.2024.104046
- [5] Y. Cai, Y. Wang, H. Chen, and J. Xiong, Molten pool behaviors and forming characteristics in wire-laser directed energy deposition with beam oscillation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. **326**, 118326, 2024; doi: 10.1016/j.jmatprotec.2024.118326
- [6] D.V. Bedenko, O.B. Kovalev, I. Smurov, and A.V. Zaitsev, Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. **95**, 902, 2016; doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.046
- [7] D.V. Bedenko, O.B. Kovalev, Calculation the efficiency of energy transfer from nanosecond CO₂-laser pulses to the iron target during plasma appearance, *Journal of Physics: Conference Series. XVI All-Russian Seminar with International Participation "Dynamics of Multiphase Media"*, 012005, 2019; doi: 10.1088/1742-6596/1404/1/012005