

## О роли капиллярных и термокапиллярных явлений при газопорошковой лазерной наплавке

М.Д. Хоменко<sup>1</sup>, Ф.Х. Мирзаде<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская 1, Шатура, 140700, Россия

**Аннотация.** Газопорошковая лазерная наплавка (ЛН) это широко распространенная аддитивная технология, однако некоторые недостатки, такие как узкое окно оптимальных параметров все еще сдерживают ее развитие. Прямое численное моделирование процессов тепломассопереноса при ЛН - это эффективный способ поиска оптимальных параметров, который дает возможность заглянуть внутрь технологии. Не смотря на то, что гидродинамические явления под воздействием лазерного излучения изучаются довольно давно, отдельные эффекты при совместном действии лазерного излучения и потока порошка на подложки слабо представлены в литературе. Разработана тепло-гидродинамическая модель ЛН для расчета микроструктуры наплавленного слоя, учитывающая контактный угол расплава и подложки. Проведено исследование влияния капиллярных явлений и контактного угла на характеристики наплавленного слоя. Результаты могут быть использованы для оптимизации и планирования ЛН.

### 1. Введение

Современные аддитивные технологии имеют два основных недостатка – это высокая цена производства и потенциальные, иногда не предсказуемые сбои процесса производства. Сейчас операторам требуется несколько попыток, что бы добиться успеха, а большинство выборов (по ориентации детали, типу и густоте поддержек, ...) делается на основе личного опыта [1]. Прямое численное моделирование лазерной наплавки (ЛН) зарекомендовало себя как эффективный вспомогательный метод определения оптимальных параметров и исследования процесса [2]. Более точные численные модели имеют огромное значение, так как сделали бы процесс производства более дешевым, автоматизированным и надежным.

Не смотря на то, что гидродинамические процессы при лазерном воздействии исследуются довольно давно [3], отдельные эффекты при совместном действии лазерного излучения и добавления частиц порошка при контакте с подложками представлены в литературе слабо. Проблема учета контактного угла в методах сквозного счета исследована достаточно хорошо [4], но в моделях ЛН он чаще всего не учитывается [5]. В общем, это не оправдано потому как контактный угол определяет ширину растекания расплава, которая имеет определяющее значение для основных параметров валика и качество полученного слоя. Большое значение контактного угла, например, приводит к образованию пор между последующими дорожками [6], а специфическая форма наплавленного валика и зоны проплавления определяет качество сцепления с подложкой [7].

Для моделирования микроструктуры при ЛН распространённым методом является мульти масштабный подход [8,9], где температурная история, рассчитанная на макро-уровне, используется для расчета микроструктуры на микро-уровне. Для последнего часто используется метод фазового поля, который дает представление о форме и размерах получаемых зерен. Метод является достаточно сложным, а для реальной качественной оценки микроструктуры часто достаточно знать средний размер зерна получаемого изделия, что открывает возможность применения более простых моделей [10]. Так же в случае мульти масштабного подхода довольно сложно получить полностью самосогласованное решение. Целью данной работы является разработка тепло-гидродинамической модели ЛН для расчета микроструктуры наплавленного слоя, учитывающая контактный угол расплава и подложки. Модель позволит исследовать натекание расплавленного порошка на подложку с различным контактным углом, оптимизировать и планировать процесс ЛН.

## 2. Описание модели

Модель включает в себя тепло-массоперенос многофазной системе: газ – жидкая ванна расплава – твердая подложка. В расплаве происходит множество взаимосвязанных процессов, поэтому особое внимание уделяется решению самосогласованной системы уравнений, где одновременно присутствуют теплопроводность, конвекция, скоростная кристаллизация наплавленного слоя и движение границы раздела фаз с учетом известного контактного угла. Гидродинамическая макро модель описана в [11], а модель расчета микроструктуры в [12,10] и здесь не приводятся. Основными движущими силами являются поверхностные термокапиллярные и капиллярные силы [3]. Их конкуренция с капиллярными силами определяет форму ванны расплава. Эти поверхностные силы в трехфазную модель среды вводятся, как объемные источники [13]:

$$S_{\text{surface}} = (f_{\text{capillary}} + f_{\text{marangoni}}) \delta \quad (1)$$

где  $\delta$  - дельта функция, которая может рассчитываться через функцию для слежения за свободной границей  $\phi$ . Капиллярные силы рассчитываются по формуле:

$$f_{\text{capillary}} = \sigma \kappa \quad (2)$$

где  $\sigma$  - поверхностное натяжение, а  $\kappa$  - кривизна поверхности.

Если  $n$  - нормальный вектор поверхности направленный из металла в воздух, который рассчитывается как:

$$n = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (3)$$

то для кривизны поверхности получаем формулу:

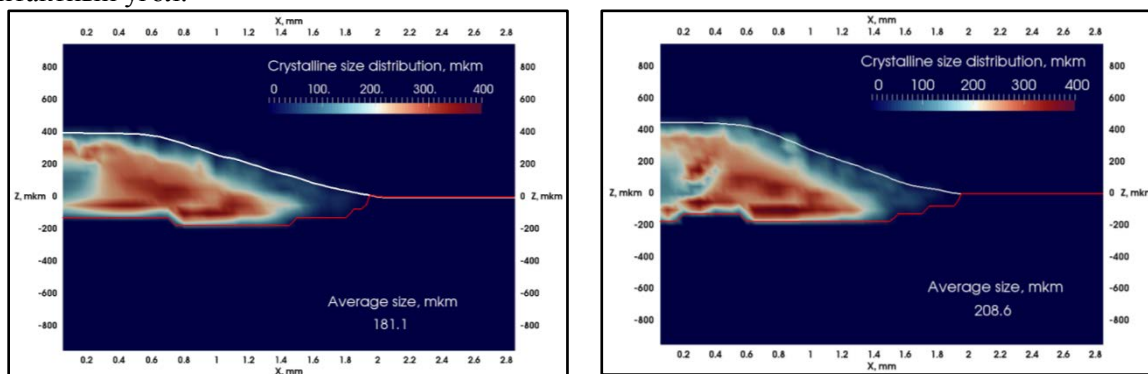
$$\kappa = -\nabla \cdot n = -\nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (4)$$

где  $\phi$  - характеризует профиль свободной поверхности. Такая постановка задачи не учитывает реальный контактный угол жидкого металла и подложки зависящий, в том числе от свойств подложки. Для его учета, на гранях подложки, компоненты нормали свободной поверхности не рассчитывается по формуле (3), а задаются в соответствии с известным значением контактного угла  $\theta$ :

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{R_x}{R} \sin(\theta) \\ n_y &= \frac{R_y}{R} \sin(\theta) \\ n_z &= -\cos(\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

где  $R_x$  – расстояние до центра ванны расплава по  $x$ ,  $R_y$  – расстояние до центра ванны расплава по  $y$ ,  $R$  – расстояние до центра ванны расплава в 2D.

Кривизна свободной поверхности  $K$  рассчитывается через модифицированную нормаль и имеет повышенные значения в случае контактного угла отличного от заданного. Капиллярные силы, стремящиеся кривизну уменьшить, подстраивают свободную поверхность под требуемый контактный угол.



**Рисунок 1.** Распределение кристаллитов в поперечном сечении наплавленных капель с различным контактным углом  $10^\circ$  (левый) и  $30^\circ$  (правый).

### 3. Результаты расчетов и выводы

Для исследования влияния контактного угла на получаемую микроструктуру моделируется наплавка никелевого порошка неподвижным лучом на подложки с различным контактным углом. Порошок подается ( $m=50$  г/мин,  $R_{jet}=2$  мм) совместно с лазерным излучением ( $P=1.5$  кВт,  $R_{beam}=2$  мм) на холодную подложку в течение 50 мс формируя одиночную каплю, а затем воздействие прекращается, и капля, остывая, кристаллизуется. На рисунке 1 показана типичная картина распределения кристаллитов в поперечном сечении для капель с контактным углом  $10^\circ$  (левый) и  $30^\circ$  (правый). Цветом показано пространственное распределение кристаллитов, белая линия это граница свободной поверхности, а красная ограничивает зону кристаллизации. В нижнем левом углу рисунка указан средний по сечению размер кристаллитов. Видно, что капля, больше растекшаяся по подложке, имеет меньшую высоту и средний размер кристаллитов. Это связано с различной скоростью охлаждения капель. Отвод тепла в подложку у более концентрированной капли слабее, за счет меньшей площади контакта.

Разработанная модель позволяет оценить микроструктуру наплавленного слоя с учетом контактного угла расплава и подложки. Показано, что увеличение контактного угла расплава приводит к увеличению среднего размера кристаллитов в наплавленном слое. Результаты могут быть использованы для оптимизации и планирования ЛН.

### 4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части проведения расчетов и при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-51-7801 итал\_г в части разработки модели и компьютерной программы.

### 5. Литература

- [1] Livesu, M. From 3D Models to 3D Prints: An Overview of the Processing Pipeline / M. Livesu, S. Ellero, J. Martínez, S. Lefebvre, M. Attene // Computer Graphics Forum. – 2017. – Vol. 36(2). – P. 537-564. DOI: 10.1111/cgf.13147.
- [2] Pinkerton, A.J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition / A.J. Pinkerton // J. Laser Appl. – 2015. – Vol. 27(S1).
- [3] Qi, H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for

- direct metal deposition / H. Qi, J. Mazumder, H. Ki // Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 100. – P. 024903.
- [4] Dianat, M. Coupled Level-Set Volume of Fluid Simulations of Water Flowing Over a Simplified Drainage Channel With and Without Air Coflow / M. Dianat // SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.– 2017. – Vol. 10(1).
- [5] Lee, Y. Simulation of transport phenomena and melt pool shape for multiple layer / Y. Lee, D.F. Farson // Journal of Laser Application. – 2016. – Vol. 28. – P. 012006. DOI: 10.2351/1.4935711.
- [6] Weerasinghe, V. Laser cladding with pneumatic powder delivery / V. Weerasinghe, W. Steen // Applied Laser Tooling. Springer - Netherlands, 1987. – P. 183-211.
- [7] de Oliveira, U. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions / U. de Oliveira, V. Ocelik, J.T.M. De Hosson // Surface & Coatings Technology. – 2005. – Vol. 197. – P. 127-136.
- [8] Nie, P. Numerical modeling of microstructure evolution during laser additive manufacturing of a nickel-based superalloy / P. Nie, O.A. Ojo, Z. Li // Acta Materialia. – 2014. – Vol. 77. – P. 85-95.
- [9] Mirzade, F.Kh. A phase field study of stress effects on microstructure formation during laser-aided direct metal deposition process / F.Kh. Mirzade // Proc. SPIE, Modeling Aspects in Optical Metrology VI. – 2017. – Vol. 10330. – P. 103301C. DOI 10.1117/12.2270122.
- [10] Khomenko, M.D. Kinetic approach in numerical modeling of melting and crystallization / M.D. Khomenko, V.Y. Panchenko, V.G. Niziev, F.K. Mirzade, F.K. Grishaev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2016. – Vol. 80(4). – P. 381-386.
- [11] Khomenko, M.D. Process planning and optimization of laser cladding considering hydrodynamics and heat dissipation geometry of parts / M.D. Khomenko, F.K. Mirzade, V.G. Niziev // Proc. ISPRAS. – 2017. – Vol. 29(6).
- [12] Хоменко, М.Д. Параметрическое исследование микроструктурных свойств валика при лазерном плавлении металлического порошка в слое / М.Д. Хоменко, Ф.Х. Мирзاده // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2017). – Самара, 2017. – С. 147.
- [13] Brackbill, J.U. A continuum method for modeling surface tension / J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach // Journal of Computational Physics. – 1992. – Vol. 100. – P. 335-354.

# On the role of capillary and thermocapillary phenomena at laser cladding

M.D. Khomenko<sup>1</sup>, F.Kh.Mirzade<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute on laser and information technologies, Branch of FSIC “Crystallography and photonics” RAS, 1, Svyatoozerskaya str., Shatura, Russia, 140700

**Abstract.** Laser cladding (LC) is a widely diffused additive manufacturing technology, but some shortcomings such as narrow processing window still limit it. Direct numerical modeling (DNS) of heat-mass transfer at LC is a cost-effective method of searching for the optimal processing parameters which allow making a glance into this technology. Nevertheless the fact that hydrodynamic phenomena after laser action are well studied, distinct convective effects after joint laser-powder action on the substrate are poorly presented in the literature. The hydrodynamic model of LC for the calculation of the microstructure of built-up layer is developed considering contact angle of the melt with the substrate. The study of capillary phenomena, the influence of contact angle on characteristics of a built-up layer is held. The results can be used for LC process optimization.

**Keywords:** numerical modeling, laser cladding, shock-capturing methods, thermocapillary forces, contact angle.