

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЗАТУХАНИЯ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ

О.Б. Ковалев, А.М. Гурин

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Представлены результаты численного решения задачи о термокапиллярной микроконвекции, возникающей под действием лазерного излучения в жидком металле при лазерной поверхностной обработке. Обсуждаются механизмы замедления течения расплава, связанные с добавлением порошкообразных компонентов для лазерного легирования или наплавки. Представлены результаты трехмерных расчетов, которые показывают, как эти механизмы могут работать. Дана оценка влиянию падающих частиц порошка в расплав на замедление лазером индуцированной термокапиллярной конвекции. Выявлена характерная особенность поведения тугоплавких частиц металлов в многовихревой ванне расплава.

**Мотивация.** Вопросам гидродинамики ванны расплава при лазерном взаимодействии с металлами в литературе всегда уделялось большое внимание [1-4]. Уже стали классическими подходы, где термоконвекция жидкого металла описывается с помощью условия Марангони [1, 2]. При наличии градиента температуры на поверхности ванны появляется сила, вызывающая движение жидкости в поверхностном слое. За счет вязкого трения и градиента поверхностного натяжения вовлекается в термокапиллярную конвекцию вся ванна расплава. Аддитивные лазерные технологии, к которым относятся лазерное легирование и наплавка, основаны на использовании различных порошкообразных материалов, которые добавляют в ванну расплава. Способы ввода порошка и материалы могут быть самые разные, начиная с металлов и сплавов, плавящихся в луче лазера во время транспортировки на подложку, и кончая тугоплавкой керамикой, которая попадает в расплав в твердом состоянии. Однако вопросы взаимодействия потока частиц порошка с ванной расплава, влияние ввода порошка на термоконвекцию ванны в настоящее время исследованы недостаточно. С одной стороны известно, какое влияние на форму ванны расплава и перенос легирующего порошка оказывает конвекция Марангони, возникающая под воздействием градиента температуры на поверхности жидкости [1, 2]. С другой стороны существуют работы [3, 4], в которых форма наплавляемого валика успешно предсказывается простыми моделями без учета течения расплава. Данные многочисленных экспериментов, представленные в виде шлифов поперечных сечений валиков, наплавленных в широком диапазоне параметров, демонстрируют форму поверхности близкую к цилиндрической [4]. Это указывает на то что термокапиллярный эффект здесь проявляется только при формировании угла смачивания. При этом растекание расплава, или образование волн на поверхности валика, которые имеют место на верхней поверхности сварного шва при лазерной сварке [5], здесь не наблюдаются. Последнее наводит на мысль, что частицы порошка, добавляемые в ванну расплава, могут как-то влиять на характеристики его течения.

Цель данной работы заключается в исследовании возможных механизмов подавления термокапиллярной конвекции за счет попадания в расплав частиц порошка для легирования или наплавки металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **S. Kou, Y. H. Wang** Three-dimensional convection in laser melted pools // Metallurgical transactions A 17, 2265-2270 (1986).
2. **G. F Antonova, G. G Gladush, F. K.; Kosyrev et al.** Quantum Electronics. **28 (5)**, 430-433 (1998).
3. **X. Wang, D. Deng, Y. Hu, Z. Liu, H. Zhang** Analytical modeling and experimental investigation of laser clad geometry. Optical Engineering 56(9), 096104 (2017), DOI: 10.1117/1.OE.56.9.096104.
4. **W. Ya, B. Pathiraj, S. Liu** 2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding // Journal of Materials Processing Technology **230**, 217–232 (2016).
5. **Jung-Ho Cho, D.F Farson, J.O. Milewski and K.J. Hollis** Weld pool flows during initial stages of keyhole formation in laser welding // Journal of Physics D: Applied Physics **42**, 17, 175502 (2009)