

УДК 537.634, 53.098, 536.331

О лазерной абляции ферромагнитной жидкости

Е. Ю. Локтионов

Впервые представлены результаты исследования интегральных характеристик эффективности лазерной абляции ферромагнитной жидкости, в т. ч. в канале и в присутствии магнитного поля. Показана возможность существенного снижения удельного массового расхода и увеличения среднemasсовой скорости абляционного потока за счет возврата капельной фазы вдоль стенок немагнитного сопла. В итоге зафиксированные удельные импульс и массовый расход достигли значений, соответствующих твердым полимерам.

PACS: 79.20.Eb, 75.50.Mm, 83.80.Gv

Ключевые слова: лазерная абляция, магнитное поле, феррофлюид, сопло, удельный массовый расход.

Введение

С точки зрения реализации системы подачи и дозировки рабочего вещества в генераторах плазмы различного назначения, жидкости являются более предпочтительными, чем твердотельные среды. В этой связи лазерная абляция исследована для многих классов жидкостей, однако, полученные результаты показали, что существует ряд серьезных проблем, общих для всех жидкостей. При этом главная из них — расплескивание — приводит к образованию капельной фазы, что не только увеличивает массовый расход и снижает эффективность воздействия, но и может быть просто неприемлемым, например, при напылении тонких пленок.

Уменьшения негативного эффекта расплескивания можно достичь при увеличении вязкости жидкости, создании тонкой пленки или вообще отдельных капель (на поверхности или в микрополости). Так, с уменьшением толщины пленки (как и при увеличении вязкости жидкости) среднemasсовая скорость продуктов абляции несколько возрастает, но все равно остается в пределах $\langle v \rangle = 30\text{—}80$ м/с (при лазерной абляции твердых тел этот параметр на 1,5—3 порядка больше [1, 2]).

Как известно, ферромагнитные жидкости (феррофлюиды) обладают рядом уникальных свойств. Однако, несмотря на то, что они могут быть получены в т. ч. и при лазерном воздействии

на металлы в жидкостях [3], нам не известно, чтобы кто-либо исследовал их лазерную абляцию [4]. Коммерческие ферромагнитные жидкости (ФМЖ) представляют собой коллоидный раствор частиц ферро- или ферримагнетика с размером 10—20 нм (и с долей в растворе 5—20 % об.), покрытых поверхностно-активным веществом (10—15 % об.) или обладающих зарядом для предотвращения агрегации. Их стационарная вязкость 0,002—2 Па·с, а намагниченность насыщения составляет 3—100 мТл. Несущими жидкостями для них могут быть вода, керосин, спирты, эфиры, алканы, масла, фтор- или кремнийорганические соединения, многие из которых плохо испаряются и имеют высокую температуру кипения в вакууме [5]. Вязкость ФМЖ в магнитном поле может увеличиваться на 50 %, причем эффект обратно пропорционален частоте для переменного поля. Для больших коллоидных частиц увеличение вязкости может достигать 200 %, т. е. этот фактор оказывает значительно большее влияние, чем напряженность поля [6]. Форма открытой поверхности феррофлюида может существенно отличаться от нормальной (отклоняться от горизонтали или покрываться характерными коническими пиками), т. е. изменяться в зависимости от конфигурации магнитного поля.

Возможность бесконтактного управления геометрией поверхности (в т. ч. толщиной пленки) и движением ФМЖ является большим преимуществом для лазерно-плазменных установок, причем время установления равновесной ориентации магнитных моментов составляет всего $\sim 10^{-7}$ с [7]. Кроме того, система хранения ФМЖ в условиях невесомости может быть существенно упрощена по сравнению с традиционными для космических применений за счет удержания жидкости в едином объеме магнитными силами.

Локтионов Егор Юрьевич, заведующий лабораторией.
Московский Государственный Технический Университет
им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
Тел. 8 (499) 263-62-99. E-mail: stepe@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2015 г.

© Локтионов Е. Ю., 2015

Целью данной работы являлось комплексное исследование интегральных характеристик эффективности лазерной абляции ферромагнитной жидкости, в т. ч. в канале и в присутствии магнитного поля.

Экспериментальная установка и результаты

Нами исследована лазерная абляция феррофлюида (EFH1, Ferrotec) в стеклянном цилиндрическом сопле (диаметром 9 мм и длиной 90 мм) и без него. Капли жидкости наносились на покрывное стекло, под которым на изменяемом расстоянии располагался неодимовый магнит. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Величина магнитной индукции в области локализации капли измерялась калиброванным магнетометром АТЕ-8702 (Актаком). Для измерения импульса отдачи использовался пленочный PVDF-датчик силы PZ-02 (Measurement Science), на конце которого было приклеено покрывное стекло с размерами 20×20×0,15 мм, обеспечивающее минимальные потери излучения при прохождении через него. Воздействие осуществлялось наносекундными (~18 нс) импульсами с энергией ~30 мДж лазерного излучения ($\lambda = 355$ нм), сфокусированного в пятно диаметром 0,1 мм.

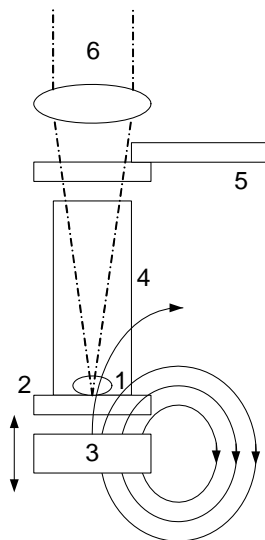


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — капля ФМЖ, 2 — немагнитная подложка, 3 — неодимовый магнит, 4 — сопло, 5 — датчик силы, 6 — лазерное излучение, стрелками показаны направления силовых линий магнитного поля

Усредненный для 10 импульсов удельный массовый расход без сопла и магнитного поля составлял $2,1 \cdot 10^{-1}$ г/Дж, в магнитном поле с индукцией 140 мТл — $1,6 \cdot 10^{-1}$ г/Дж (т. е. снижение пропорционально ожидаемому увеличению вязкости). При использовании сопла этот параметр в магнитном поле 480 мТл снижался на 3 порядка, а имен-

но, до $2 \cdot 10^{-4}$ г/Дж, т. е. становился сопоставим с таковым для твердых полимеров. В сопле без поля капли оставались на стенках сопла, а при его наличии — двигались в сторону магнита. Бегущее вдоль стенок сопла магнитное поле может ускорить их возвратное движение. При использовании стального (магнитного) сопла капли собирались на его выходном торце, где на кромках создается наибольший магнитный поток.

Увеличение удельного механического импульса отдачи при воздействии на капли в магнитном поле составляло ок. 30 % (до $4 \cdot 10^{-3}$ Н·с/Дж), а энергетическая эффективность повышалась примерно в полтора раза (до 3%), оставаясь на характерном для жидкостей низком уровне.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при воздействии лазерного излучения на ФМЖ, помещенную в магнитное поле, эффективность преобразования энергии лазерного излучения в кинетическую энергию абляционного потока возрастает пропорционально индуцируемому полем увеличению вязкости. При радиальном ограничении потока немагнитным соплом магнитное поле приводит к оседанию ФМЖ на его стенках и возвращению на подложку капель ФМЖ, способствуя существенному уменьшению удельного массового расхода.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (грант МК-203.2014.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 15-38-20890) на оборудовании УНУ "Пучок-М", развиваемой при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ (RFMEFI59014X0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Phipps C., et al. // J. Propulsion and Power. 2010. V. 26. No. 4. P. 609.
2. Локтионов Е. Ю. и др. // Опт. спектроск. 2012. Т. 112. № 4. С. 631.
3. Yang L. Self-Assembly and Ordering Nanomaterials by Liquid-Phase Pulsed Laser Ablation. Ph.D. thesis. — Bristol: University of Bristol, 2007.
4. Kruusing A. Handbook of liquids-assisted laser processing. — Amsterdam: Elsevier, 2007.
5. Odenbach S. Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids. — Berlin: Springer, 2009.
6. Odenbach S. Magnetoviscous effects in ferrofluids. — Berlin: Springer, 2002.
7. Брук Э. Т., Фертман В. Е. "Ёж" в стакане. Магнитные материалы: от твердого тела к жидкости. — Минск: Вышэйшая школа, 1983.

Laser ablation of ferrofluids

E. Yu. Loktionov

Bauman Moscow State Technical University
5-1, 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: stcpe@bmstu.ru

Received September 28, 2015

For the first time, the ferrofluid laser ablation integral efficiency performance data are presented, for impact in nozzle and magnetic field also. Ability of sufficient specific mass flow rate reduction and ablation plume mass averaged velocity increase due to drops retrieval along non-magnetic nozzle walls have been demonstrated. As a result, a specific impulse and mass flow reached the rates corresponding to solid polymers.

PACS: 79.20.Eb, 75.50.Mm, 83.80.Gv

Keywords: laser ablation, magnetic field, ferrofluid, nozzle, specific mass flow.

REFERENCES

1. C. Phipps, et al., *J. Propulsion and Power* **26**, 609 (2010).
2. E. Yu. Loktionov, et al., *Opt. Spectrosc.* **112**, 631 (2012).
3. L. Yang, *Self-Assembly and Ordering Nanomaterials by Liquid-Phase Pulsed Laser Ablation. Ph.D. thesis.* (Bristol: University of Bristol, 2007).
4. A. Kruusing, *Handbook of Liquids-Assisted Laser Processing* (Amsterdam: Elsevier, 2007).
5. S. Odenbach, *Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids.* (Berlin: Springer, 2009).
6. S. Odenbach, *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids.* (Berlin: Springer, 2002).
7. E. T. Bruk and V. E. Fertman, "Hedgehog" in a Cup. *Magnetic Materials* (Minsk, Vysh. Shkola, 1983) [in Russian].