

03.1

## Особенности эволюции канала при глубоком проплавлении металлов лазерным излучением

© Р.Д. Сейдгазов, Ф.Х. Мирзаде

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Шатура, Московская обл., Россия  
E-mail: seidgazov@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 14 июля 2021 г.

Принято к публикации 16 июля 2021 г.

Приведены результаты скоростной регистрации образования канала проплавления в титане при точечном воздействии лазерного излучения. Установлено, что эволюция канала завершается коллапсом еще до прекращения действия (выключения) непрерывного лазерного излучения.

**Ключевые слова:** глубокое проплавление, канал проплавления, коллапс, лазерное излучение.

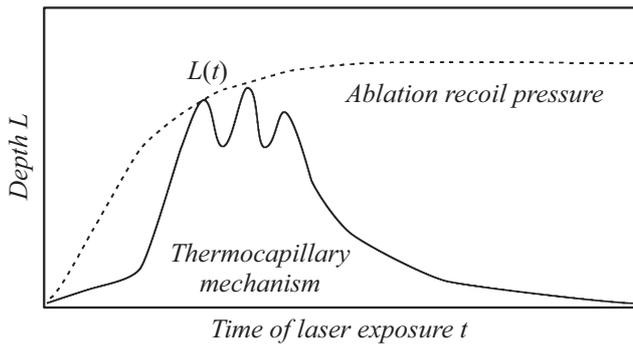
DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51622.18838

При воздействии на металлы лазерного излучения технологического диапазона интенсивности ( $\sim 1 \text{ MW/cm}^2$ ) наблюдается эффект глубокого проплавления с образованием полого канала, по которому лазерное излучение проникает в глубь металла и обеспечивает большую глубину плавления. Этот эффект используется в лазерной сварке металлов большой толщины. В последние годы интерес к нему возрос в связи с активным развитием аддитивной технологии с применением метода селективного лазерного плавления металлических порошковых слоев [1]. Моделирование этих технологических процессов возможно при достоверных и экспериментально обоснованных знаниях о механизме образования канала. В литературе рассматриваются два возможных механизма образования канала. Первый механизм общеизвестен и предполагает вытеснение расплава давлением отдачи расширяющихся с расплавленной поверхности паров [2] (абляционное давление). Абляционный механизм может доминировать в режиме глубокого проплавления металлов, если энергозатратный процесс испарения достаточно интенсивен и давление отдачи паров достаточно высоко для механического поддержания канала проплавления, но при этом затраты мощности на испарение незначительны ( $\sim 1\%$  от поглощенной мощности согласно измерениям [3]). Оценки не подтверждают одновременное выполнение этих взаимоисключающих требований [4]. Второй механизм связан с зависимостью поверхностного натяжения расплава от температуры, что при неравномерном прогреве поверхности приводит к появлению тангенциальных термокапиллярных сил и возникновению термокапиллярного течения расплава (термокапиллярный эффект) [5,6]. Для образования кратера термокапиллярными силами необходимо, чтобы течение расплава происходило от центра пятна облучения к периферии (отрицательный температурный коэффициент поверхностного натяжения,  $d\sigma(T)/dT < 0$ ) при сохранении сдвиговой

структуры потока на время формирования кратера. Для выполнения условия  $d\sigma(T)/dT < 0$  температура расплава должна превышать температурную точку инверсии знака  $d\sigma(T)/dT$ , которая зависит от содержания примесей в металле и обычно на несколько сотен градусов выше температуры плавления [7]. В режиме глубокого проплавления это условие гарантированно выполняется, поскольку температура поверхности канала проплавления близка к температуре кипения [8]. Характерная для начальной стадии плавления сдвиговая структура термокапиллярного потока сохраняется во время формирования канала, если мощность излучения достигает порогового значения (при заданном размере пятна) для перехода в режим глубокого проплавления [9].

Механизм абляционного давления позволяет моделировать относительно простые технологические задачи, но сопровождается значительным искажением гидродинамических параметров и характеристик истечения паров [4], что ограничивает моделирование сложных гидродинамических процессов дефектообразования. Некоторые исследователи связывают это с неадекватностью имеющихся знаний о физике процесса [10–12] и отмечают отсутствие экспериментальных подтверждений доминирования механизма абляционного давления в технологическом диапазоне интенсивности [13], что позволяет предполагать существование и других возможных механизмов. Цель настоящей работы состоит в выявлении доминирующего механизма переноса расплава при образовании канала проплавления в металле путем точечного воздействия непрерывного лазерного излучения. Вывод о доминирующем механизме переноса расплава можно сделать исходя из особенностей эволюции канала проплавления при точечном и продолжительном воздействии непрерывного излучения.

Доминирование механизма абляционного давления паров предполагает такую эволюцию канала в процессе точечного проплавления, при которой глубина канала



**Рис. 1.** Эволюция канала проплавления на глубину  $L(t)$  при доминирующей роли разных механизмов его образования (термокапиллярного или абляционного давления паров).

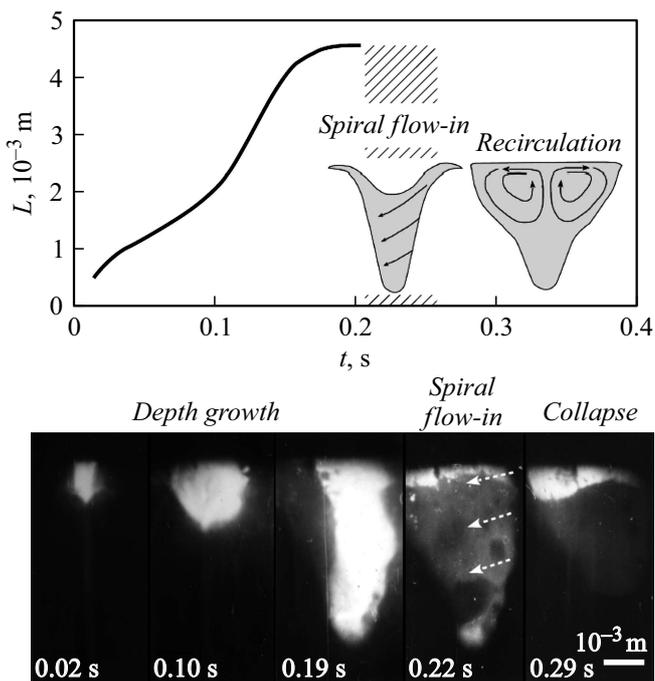
достигает насыщения и сохраняется на этом уровне с незначительными флуктуациями в течение любого продолжительного времени лазерного воздействия (рис. 1), что подтверждают демонстрационные эксперименты на жидкостях [2]. Интенсивное испарение во время точечного и длительного воздействия непрерывного лазерного излучения должно за счет высокого давления отдачи паров обеспечивать столь же продолжительное механическое поддержание канала проплавления. Исчезновение канала в этом случае возможно только после прекращения действия излучения.

Термокапиллярный механизм предполагает иную эволюцию канала проплавления [5], особенность которой определяется тангенциальным направлением сил поверхностного натяжения, возникающих при неоднородном лазерном нагреве. Эти термокапиллярные силы приводят расплав в движение и уравниваются противодействием вязких сил. С превышением порогового значения мощности ( $P_{th}$ ) возникшее термокапиллярное растекание расплава от центра к периферии пятна облучения сопровождается значительной деформацией поверхности и образованием глубокого канала. Этому способствует рост эффективного поглощения излучения из-за многократных переотражений в полости канала. При этом главная роль принадлежит взаимодействию фазовых границ с участием вязкого подслоя. Оно формирует гидродинамические условия для установившегося процесса формирования канала при равенстве скорости фронта плавления  $V_M$  и скорости деформации поверхности  $V_S$  ( $V_M = V_S$ ) [5,6]. Завершение установившегося процесса формирования канала проплавления (при достижении предельной глубины) является началом формирования термокапиллярной рециркуляции (конвекции Марангони) с замыканием линий тока. Канал при этом затекает и исчезает. Такой коллапс отличает эволюцию при термокапиллярном механизме образования канала, что подтверждено модельным экспериментом по проплавлению парафина [5]. Возможность доминирующей роли термокапиллярного механизма при проплавлении металлов подтверждается также оценками [4,6,9,14,15].

Авторы работы [16] при численном моделировании лазерного сверления алюминия показали, что относительное влияние на глубину кратера абляционного давления отдачи и термокапиллярного эффекта зависит от температуры нагрева, причем первое преобладает, когда нагрев значительно превышает температуру кипения, а второе — при температурах вблизи точки кипения. Оказалось, что вблизи температуры кипения добавление абляционного давления к термокапиллярному эффекту увеличивает глубину кратера всего на  $\sim 10\%$ . Согласно измерениям [8], температура расплава в канале проплавления достигает насыщения вблизи точки кипения, поэтому результаты [16] можно рассматривать как подтверждение доминирования термокапиллярного механизма при глубоком проплавлении. Особенности механизмов определяют эволюцию канала проплавления, отличающуюся наличием или отсутствием завершающего коллапса при доминировании термокапиллярного или абляционного механизма (рис. 1). Это дает возможность экспериментально определить доминирующий механизм формирования канала по характеру его эволюции в металлическом образце (по наличию или отсутствию коллапса под действующим излучением). Проведение такого эксперимента является целью настоящей работы.

Для визуализации процесса проплавления использован образец в виде „сэндвича“ из плотно прижатых пластин титана и ситалла (рис. 2). Регистрация проводилась через оптически прозрачный ситалл с частотой съемки 1000 fps. Излучение непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью 1.5 kW фокусировалось на титан вблизи стыка пластин. Защита титана от влияния атмосферных газов осуществлялась за счет подачи гелия.

Для фокусировки излучения использовано условие формирования канала проплавления за счет термокапиллярного механизма [9,14], которое для титана в системе СИ имеет вид  $AP_{th} \approx 1.6 \cdot 10^7 d^{4/3}$  ( $A$  — эффективное поглощение в канале проплавления,  $d$  — диаметр пятна фокусировки). Из-за многократных переотражений в канале проплавления поглощение  $A$  может быть в пределах от 0.6 до 0.9 [17]. При  $A = 0.6-0.9$  и мощности лазера 1.5 kW для перехода в режим глубокого проплавления должно выполняться условие  $d < 0.82-0.92$  mm, которое было выполнено при фокусировке излучения. После начала лазерного воздействия зарегистрированы изображения теплового следа канала проплавления на стадии его роста, созданные свечением раскаленного до высокой температуры металла (рис. 2). Свечение в видимой области спектра начинается при температуре 530–580°C и имеет ослепительно белый цвет каления при температуре 1250–1300°C, близкой к температуре плавления титана 1400°C. Максимальная глубина теплового следа при времени 0.19 s (третий кадр на рис. 2) составляет 4.5 mm и намного превышает его ширину, что указывает на формирование канала проплавления. После достижения предельной глубины исчезновение изображения теплового следа канала проплавления наблюдается одновременно по всей высоте и происходит



**Рис. 2.** Изображения теплового следа канала проплавления в титане при длительном точечном воздействии непрерывного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью 1.5 kW. Эволюция канала проплавления завершается его исчезновением (коллапсом).

в результате движения справа налево быстрой волны потемнения (подобно движению „шторки“). Такое исчезновение изображения исключает продолжение линии  $L(t)$  на рис. 2, что условно помечено заштрихованной областью. По-видимому, такой характер исчезновения изображения может быть следствием возникновения спиралевидных потоков при затекании канала. Регистрация проплавления продолжалась достаточное время ( $\sim 2$  s), чтобы убедиться в невозможности повторного образования канала.

Следует обратить внимание на эксперименты [1], в которых с помощью сверхвысокоскоростной синхротронной (рентгеновской) визуализации регистрируется эволюция канала проплавления в титановом сплаве при точечном лазерном воздействии. Однако отслеживание эволюции глубины канала  $L(t)$  внезапно и без обсуждения причин прекращается после завершения стадии роста канала и последующей стадии развития колебаний в канале. Преждевременное прекращение отслеживания изменения глубины канала от времени  $L(t)$  в [1] отражено для всех десяти представленных экспериментов с изменением мощности лазера и диаметра пятна фокусировки и также может быть связано с исчезновением канала в результате его коллапса, который остался без внимания или без объяснения авторов.

Таким образом, обнаруженный нами коллапс канала проплавления не противоречит экспериментальным данным [1] и дополняет их. Мы обращаем внимание на

то, что эволюция канала проплавления в металле при точечном и продолжительном воздействии лазерного излучения позволяет экспериментально определить доминирующий механизм формирования канала проплавления. Результаты такого эксперимента в совокупности с данными [1] дают основание полагать, что эволюция канала проплавления в металле (при точечном и продолжительном воздействии лазерного излучения) завершается коллапсом под действующим излучением, что указывает на термокапиллярный механизм образования канала.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] R. Cunningham, C. Zhao, N. Parab, C. Kantzos, J. Pauza, K. Fezzaa, T. Sun, A.D. Rollett, *Science*, **363** (6429), 849 (2019). DOI: 10.1126/science.aav4687
- [2] Ф.В. Бункин, М.И. Трибельский, УФН, **130** (2), 193 (1980).
- [3] Y. Kawahito, N. Matsumoto, Y. Abe, S. Katayama, *Welding Int.*, **27** (2), 129 (2013). DOI: 10.1080/09507116.2011.606151
- [4] R.D. Seidgazov, in *IEEE 8th Int. Conf. on advanced optoelectronics and lasers (CAOL-2019)* (Sozopol, Bulgaria), p. 216. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019431
- [5] Р.Д. Сейдгазов, Ю.М. Сенаторов, *Квантовая электроника*, **15** (3), 622 (1988). [R.D. Seidgazov, Yu.M. Senatorov, *Sov. J. Quant. Electron.*, **18** (3), 396 (1988). DOI: 10.1070/QE1988v018n03ABEH011530]
- [6] R.D. Seidgazov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42** (17), 175501 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/17/175501
- [7] *Справочник по чугуноному литью*, под ред. Н.Г. Гиршовича (Машиностроение, Л., 1978).
- [8] K. Hirano, R. Fabbro, M.J. Muller, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (43), 435402 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/43/435402
- [9] Р.Д. Сейдгазов, Ф.Х. Мирзаде, *Сварочное производство*, № 5, 20 (2021).
- [10] R. Fabbro, M. Hamadou, F. Coste, *J. Laser Appl.*, **16** (1), 16 (2004). DOI: 10.2351/1.1642633
- [11] T. DebRoy, S.A. David, *Rev. Mod. Phys.*, **67** (1), 85 (1995). DOI: 10.1103/RevModPhys.67.85
- [12] M. Courtois, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, 155503 (2016). DOI: 10.1088/0022-3727/49/15/155503
- [13] A. Mahrle, E. Beyer, *Phys. Scripta*, **94** (7), 075004 (2019). DOI: 10.1088/1402-4896/ab04c3
- [14] R.D. Seidgazov, F.Kh. Mirzade, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **759**, 012023 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012023
- [15] R.D. Seidgazov, F.Kh. Mirzade, in *IEEE Int. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2020)* (IEEE, 2020), p. 1. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253238
- [16] S. Ly, G. Guss, A.M. Rubenchik, W.J. Keller, N. Shen, R.A. Negres, *J. Bude, Sci. Rep.*, **9**, 8152 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-44577-6
- [17] P.W. Fuerschbach, *Welding J.*, **75** (1), 24s (1996).