

## 06 Особенности профиля поверхности при лазерном воздействии на медь в кислородсодержащей среде

© Ю.Н. Завалов, А.В. Дубров, Р.Д. Сейдгазов, П.С. Родин, О.И. Шаршов, Ф.Х. Мирзаде

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия  
E-mail: dubrov.av@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2024 г.

В окончательной редакции 11 сентября 2024 г.

Принято к публикации 18 сентября 2024 г.

Рассмотрены факторы формирования профиля поверхности меди при импульсном лазерном воздействии в атмосфере аргона, азота и в кислородсодержащей среде. В последнем случае продемонстрирован эффект изменения направления изгиба поверхности на противоположный при одинаковом знаке температурного коэффициента поверхностного натяжения материала. Наблюдаемый выпуклый профиль связан с частичным термическим разрушением оксидной пленки на поверхности расплава в области максимального нагрева. Выпуклый профиль поверхности может быть причиной нестабильности результатов лазерных технологических операций с воздействием на медь в кислородсодержащей среде.

**Ключевые слова:** расплав, медь, оксид меди, лазерные технологии.

Процесс проплавления меди и других высокоотражающих металлических материалов сфокусированным лазерным излучением (ЛИ) продолжает вызывать научный интерес в связи с его реализацией в ряде практических приложений [1,2]. Высокие характерные значения отражающей способности и теплопроводности меди осложняют процесс ее термической лазерной обработки. Для достижения порога плавления необходимо использовать высокую ( $\geq 1 \text{ MW/cm}^2$ ) интенсивность лазерного излучения. При этом нестабильность процесса и значительная вариативность масштаба воздействия ЛИ в кислородсодержащей газовой среде остаются часто упоминаемыми в литературе проблемами [3,4]. Так, переменная длительность задержки начала проплавления поверхности инфракрасным ЛИ в точечной лазерной сварке меди ведет к изменению эффективной длительности самого процесса сварки от импульса к импульсу, что, как показано в [4], приводит к образованию дефектов.

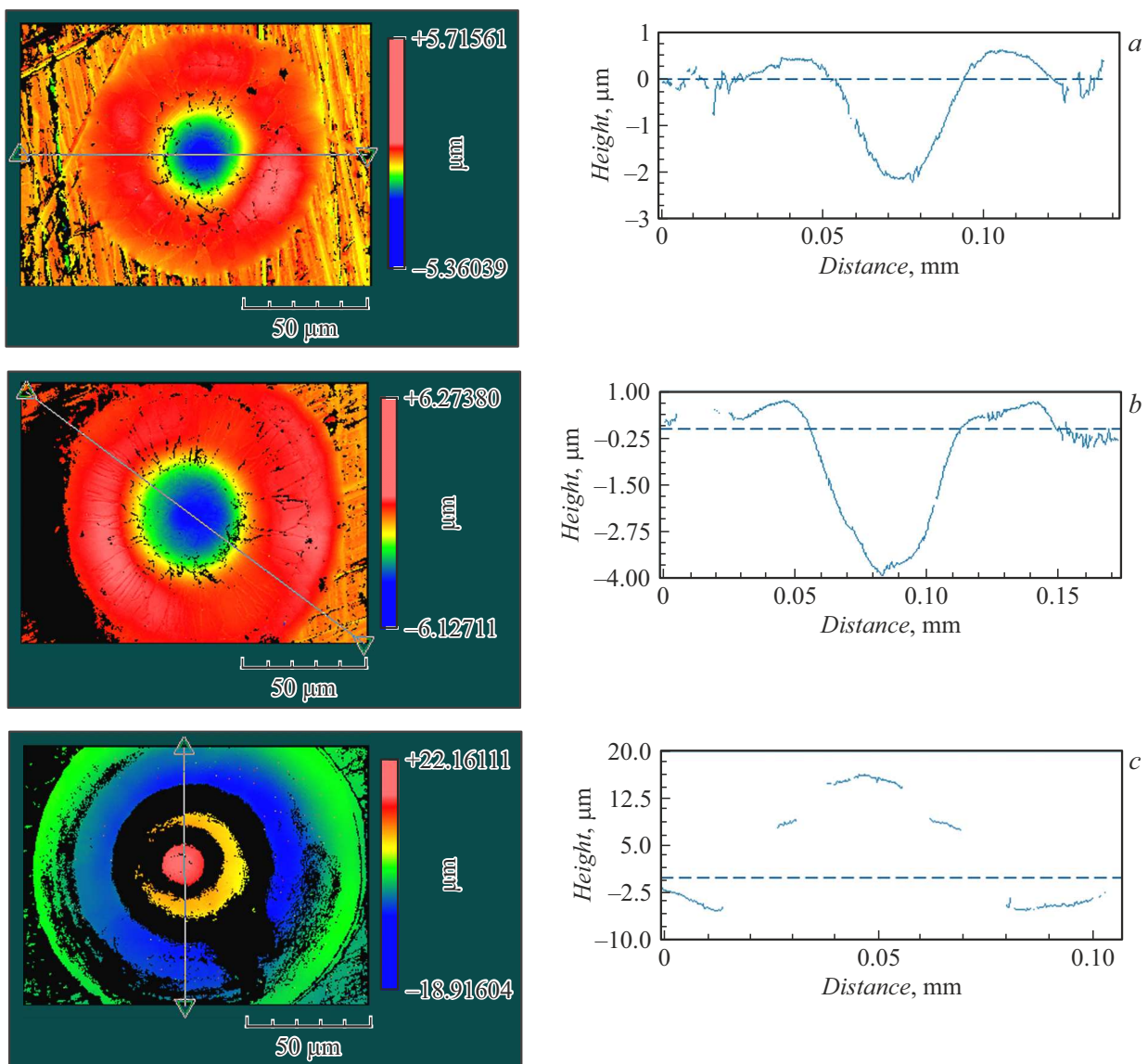
Одним из подходов, позволяющих снизить тепловые потери и повысить эффективность использования энергии лазера при обработке меди, является модуляция мощности [5]. В частности, использование импульсов наносекундной длительности позволяет стабильно проводить лазерную обработку меди с высокой интенсивностью лазерного излучения при сравнительно низких энергозатратах, что важно в нано- и микротехнологиях [6]. В [7] показано снижение до 0.74% содержания кислорода на дне канала, сформированного в среде воздуха импульсом ЛИ наносекундной длительности, при пропускании постоянного тока через образец меди. Эффективность нагрева меди существенно возрастает при чернении или оксидации поверхности меди, а также при использовании лазеров с излучением в сине-зеленом или ультрафиолетовом диапазоне спектра волн.

Вместе с тем вопрос выбора вспомогательного газа остается открытым. Например, в работе [8] проде-

монстрирована возможность повышения относительной плотности изделий и обеспечения отсутствия трещин в аддитивной технологии селективного лазерного плавления путем преднамеренного окисления поверхности медного порошка. В [9] высказано мнение, что такие результаты бросают вызов традиционному представлению о том, что эффекты окисления в аддитивном производстве нежелательны. В настоящей работе исследовался профиль поверхности медных образцов после воздействия импульсов лазерного излучения с целью определения влияния вида вспомогательного газа на формирование ванны расплава.

В эксперименте использовался волоконный лазер RFL-QCW150 (Raycus) с длиной волны 1070 nm, пиковой мощностью 1500 W и равномерным распределением интенсивности в пятне. Излучение фокусировалось на поверхности пластины с помощью оптической системы BW210 (Raytools). Оценка интенсивности излучения на поверхности при 100% мощности с учетом измеренного размера лазерного пятна  $190 \mu\text{m}$  составляет около  $5.4 \text{ MW/cm}^2$ . В качестве мишени использовались пластины меди марки М1 (аналог Cu-ETP) размером  $20 \times 36 \times 3 \text{ mm}$  с содержанием кислорода менее 0.03%. Область воздействия излучения обдувалась газом с расходом 20 l/min. Для обдува использовался аргон (содержание кислорода менее 7 ppm), азот (содержание кислорода менее 5 ppm) или атмосферный воздух. Результирующая форма поверхности исследовалась на интерферометрическом профилометре Zygo NewView 7300 (Zygo Corp.), а также в поляризованном свете на микроскопе MMP-2 (БИОМЕД).

В эксперименте осуществлялось воздействие ЛИ на неподвижную медную мишень с использованием импульсов прямоугольной формы длительностью 0.3 или 0.5 ms. Диапазон изменения мощности излучения составлял 1000–1300 W для импульсов длительностью 0.3 ms



Профиль поверхности в области воздействия ЛИ. Слева — 3D-профиль с указанием линии сечения, справа — сечение профиля. Режимы воздействия: *a* — обдув аргоном, мощность 1185 W; *b* — обдув азотом, мощность 1230 W; *c* — обдув воздухом, мощность 1185 W. Пропуски в данных связаны с ограничением оптической регистрации высокоотражающих поверхностей под большими углами наклона.

и 1000–1500 W при длительности 0.5 ms. Использовался шаг изменения мощности 15 W. Для оценки воспроизводимости результатов эксперименты многократно повторялись с постоянным набором параметров.

При длительности импульсов 0.5 ms стабильное формирование области проплавления происходило при мощности выше 1185 W. Ниже этого значения наблюдалась значительная нестабильность результатов воздействия независимо от рода газа. Например, при мощности 1110 W оплавление поверхности не наблюдалось в 11 случаях из 36. С другой стороны, при превышении мощности 1230 W в воздушной среде или 1275 W при использовании обдува аргоном или азотом наблюдался выброс расплава. В промежуточном диапазоне мощно-

сти, когда происходило стабильное оплавление материала без признаков выброса расплава, итоговый профиль поверхности демонстрировал зависимость от рода газа: при обдуве аргоном или азотом в центральной части области воздействия формировалось углубление, а в воздушной среде формировалась выпуклость (см. рисунок). В результате воздействия ЛИ формируется осесимметричный профиль. Наблюдаемый перепад высот при обдуве азотом или аргоном составил 3–4 μm. При обдуве воздухом перепад варьировался в различных отпечатках в пределах от 15 до 23 μm при постоянных параметрах облучения. При использовании более коротких импульсов длительностью 0.3 ms выброса расплава не наблюдалось при мощностях вплоть до 1300 W. При

этом отсутствовала зависимость профиля поверхности от рода газа: вогнутый профиль формировался в том числе и в воздушной среде.

С использованием поляризационной микроскопии [10] было подтверждено формирование оксидной пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  на поверхности образцов в воздушной среде. В среде аргона и азота формирования оксидной пленки не наблюдалось.

При гауссовом и равномерном распределении интенсивности максимальные значения температуры предполагаются в центральной части ванны [11]. Известно, что величина поверхностного натяжения расплава меди снижается с ростом температуры. В такой ситуации обычно возникает вогнутый профиль поверхности, связанный с вытеснением расплава к периферии под действием термокапиллярных сил [12], что наблюдается в эксперименте при обдуве аргоном или азотом. В [13,14] приведены результаты исследований влияния поглощения кислорода на поверхностное натяжение жидкой меди, которые свидетельствуют о снижении поверхностного натяжения с увеличением парциального давления кислорода. В [14] показано, что при парциальном давлении кислорода более 1–3 Па поверхностное натяжение оксидной пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  снижается с ростом температуры, в этом случае вогнутый профиль должен был бы наблюдаться и при оксидации расплава в воздушной среде.

Возможным объяснением наблюдаемого выпуклого профиля поверхности в кислородсодержащей среде может быть предположение о термическом разложении оксидной пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$ . При температурах выше 2100 К соединение  $\text{Cu}_2\text{O}$  восстанавливается до меди с выделением кислорода [15]. Таким образом, в центральной области как области наибольшего нагрева происходит термическое разрушение оксидной пленки с обнажением расплава меди. Поскольку величины поверхностного натяжения расплава меди вдвое выше, чем у  $\text{Cu}_2\text{O}$  [13], после разрушения пленки в центральной части ванны образуется область повышенного поверхностного натяжения по сравнению с периферией. Такое распределение образует наблюдаемый локальный подъем уровня расплава к окончанию импульса длительностью 0.5 ms. После воздействия импульса 0.3 ms подъема расплава не наблюдалось. По-видимому, процесс формирования выпуклой поверхности требует большего времени существования расплава.

Оценим возможность деформации поверхности в результате распространения капиллярных волн. Частота  $f$  капиллярных волн с длиной  $\lambda$  на поверхности ванны расплава зависит от глубины жидкости  $h < \lambda$ :  $f = 2\pi\sqrt{h\sigma/\rho}/\lambda^2$ , где  $\rho$  — плотность, а  $\sigma$  — поверхностное натяжение расплава меди. Время распространения волны длиной  $d$  при  $h = 0.01$  mm и  $\sigma = 1.3$  N/m можно оценить как  $1/f \sim 0.16$  ms, что меньше используемых длительностей импульса. С ростом  $h$  и понижением  $\lambda$  времена распространения уменьшаются. Таким образом, за время импульса ЛИ поверхность может искривляться за счет распространения по ней

капиллярных волн. В таком случае, однако, итоговая форма поверхности определялась бы глубиной ванны расплава и демонстрировала бы с учетом ее непостоянства разброс независимо от рода газа. Статистика же по полученным отпечаткам для аргона, азота и воздуха надежно соотносит вид профиля поверхности с родом газа.

Показан эффект формирования выпуклой поверхности в центре области воздействия ЛИ в среде воздуха, что предположительно определяется термическим разрушением оксидной пленки на поверхности расплава в области максимального нагрева. С этим эффектом может быть связана отмечаемая в литературе нестабильность результатов лазерных технологических операций с воздействием на медь в кислородсодержащей среде.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] K. Schricker, L. Schmidt, H. Friedmann, C. Diegel, M. Seibold, P. Hellwig, F. Fröhlich, J.P. Bergmann, F. Nagel, P. Kallage, A. Rack, H. Requardt, Y. Chen, *Procedia CIRP*, **111**, 501 (2022). DOI: 10.1016/j.procir.2022.08.079
- [2] L. Gargalis, J. Ye, M. Strantzis, A. Rubenchik, J.W. Murray, A.T. Clare, I.A. Ashcroft, R. Hague, M.J. Matthews, *J. Mater. Process. Technol.*, **294**, 117130 (2021). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117130
- [3] S.T. Auwal, S. Ramesh, F. Yusof, S.M. Manladan, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **96** (1–4), 475 (2018). DOI: 10.1007/s00170-017-1566-5
- [4] M. Mattern, T. Weigel, A. Ostendorf, *Mater. Res. Express*, **5** (6), 066545 (2018). DOI: 10.1088/2053-1591/aacc3a
- [5] J. Ning, L.J. Zhang, X.Q. Yin, J.X. Zhang, S.J. Na, *Mater. Des.*, **178**, 107871 (2019). DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107871
- [6] Т. В. Малинский, В. Е. Роголин, В. Я. Шур, Д. К. Кузнецов, *ФММ*, **124** (7), 653 (2023). DOI: 10.31857/S0015323022600721 [T.V. Malinskii, V.E. Rogalin, V.Ya. Shur, D.K. Kuznetsov, *Phys. Metals Metallogr.*, **124** (7), 728 (2023). DOI: 10.1134/S0031918X2360104X].
- [7] J. Li, W. Zhang, H. Zheng, J. Gao, C. Jiang, *Opt. Laser Technol.*, **163**, 109372 (2023). DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109372
- [8] S.D. Jadhav, J. Vleugels, J.P. Kruth, J. Van Humbeeck, K. Vanmeensel, *Mater. Des. Process. Commun.*, **2** (2), e94 (2019). DOI: 10.1002/mdp2.94
- [9] H.Y. Chia, L. Wang, W. Yan, *Acta Mater.*, **249**, 118824 (2023). DOI: 10.1016/j.actamat.2023.118824
- [10] J. Zhang, T. Chen, G. Su, C. Li, F. Zhao, W. Mi, *Eng. Fail. Anal.*, **140**, 106539 (2022). DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106539
- [11] S.N. Grigoriev, A.V. Gusarov, A.S. Metel, T.V. Tarasova, M.A. Volosova, A.A. Okunkova, A.S. Gusev, *Metals*, **12** (5), 722 (2022). DOI: 10.3390/met12050722
- [12] Y. Jiang, Y. Cheng, X. Zhang, J. Yang, X. Yang, Z. Cheng, *Optik*, **203**, 164044 (2020). DOI: 10.1016/j.jjleo.2019.164044

- [13] M. Abbasi, J. Lee, M. Shin, Y. Kim, Y. Kang, Appl. Surf. Sci., **313**, 116 (2014). DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.153
- [14] M. Diemer, A. Neubrand, K.P. Trumble, J. R?del, J. Am. Ceram. Soc., **82** (10), 2825 (1999). DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb02163.x
- [15] K. Vutova, V. Stefanova, V. Vassileva, M. Kadiyski, Materials, **15** (3), 936 (2022). DOI: 10.3390/ma15030936