монокристаллического алмаза // Естественные и математические науки в современном мире : сб. ст. по материалам XXXIX Междунар. науч.-практ. конф. - Новосибирск : АНС «СибАК», 2016. - № 2 (37). - С. 140–146.

Рецензент: физика-математика илимдеринин кандидаты Мамытбеков У.К.

УДК 621.373.826:536.2
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-359-366

Мурзакулова И.Ч., Токтогонов С.А., Жунушев А.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Мурзакулова И.Ч., Токтогонов С.А., Жунушев А.
КНУ имени Жусупа Баласагына
I. Murzakulova, S. Toktogonov, A. Junushev
KNU Jusup Balasagyn

ORCID 0009-0000-6637-1056
ORCID 0009-0007-2851-5988

МЕТАЛЛДАРДЫ УЗГҮЛТҮКСҮЗ CO_2-ЛАЗЕР МЕНЕН НУРЛАНТКАНДА ЛАЗЕРДИК ЭРОЗИЯЛЫК ФАКЕЛДИН ПАРАМЕТРЛЕРИН ЭСЕПТӨӨ
РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА
CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE LASER EROSION PLUME

Кыскача мүнөздөмө: Бул иште орточо интенсивдүүлүккө ээ үзгүлтүксүз CO_2-лазердик нурлануу металл үлгүлөрү менен аракеттенгенде түзүлгөн лазердик эрозиялык факелдин (ЛЭФ) эксперименттик жана теориялык изилдөөлөрүнүн жыйынтыктары берилет. Иштин максаты – ЛЭФтин жылуулук-физикалык мүнөздөмөлөрүн изилдөө жана эксперименттик маалыматтардын негизинде анын негизги параметрлерин эсептөө. ЛЭФтин түзүлүү процесстерине талдоо жүргүзүлүп, факелдин ички тыгыз жогорку температуралуу аймагы жана буулар менен майда тамчылуу фазадан турган тышкы аймагы айырмаланды. Эксперименттердин негизинде факелдин түбүндөгү температуранын лазер нурунун интенсивдүүлүгүнө болгон көз карандылыгы аныкталып, факелдин пайда болушу порогдук мүнөзгө ээ экени көрсөтүлдү. ЛЭФтин температурасын эсептөө үчүн моделдер сунушталды. Теориялык жана эксперименттик натыйжаларды салыштыруу алардын сапаттык жактан шайкештигин көрсөттү жана стационардык лазердик эрозиялык факелди түзүүдө жылуулук-физикалык процесстердин жана плазмалык экрандоонун ролун тактоого мүмкүндүк берди.

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования лазерного эрозионного факела (ЛЭФ) металлов, образующегося при взаимодействии непрерывного CO_2-лазерного излучения умеренной интенсивности с металлической мишенью. Целью исследования являлось изучение теплофизических характеристик ЛЭФ и расчёт его основных параметров на основе полученных экспериментальных данных. Проведён анализ процессов формирования ЛЭФ, выделены внутренняя плотная высокотемпературная область и внешняя область паров и жидко-капельной фазы. На основе экспериментов получены зависимости температуры основания факела от интенсивности лазерного излучения и показан пороговый характер образования факела. Предложена модель для расчёта температуры зоны воздействия. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов показало качественное согласие и позволило уточнить роль теплофизических процессов и плазменного экранирования в формировании стационарного лазерного эрозионного факела.

Abstract: The paper presents the results of experimental and theoretical studies of the laser erosion plume (LEP) of metals formed under the action of a continuous CO_2 laser beam of moderate intensity on a metallic target. The aim of the study is to investigate the thermophysical characteristics of the LEP and to calculate its main parameters using experimental data. The formation of the plume is analyzed, and two regions are distinguished: an inner dense high-temperature core and an outer region consisting of vapor and droplet phases of the target material. Experimental dependences of the plume base temperature on laser intensity are obtained, demonstrating the threshold character of plume formation. A model for calculating the temperature in the interaction zone is proposed. A comparison between theoretical predictions and experimental data shows qualitative agreement and clarifies the role of thermophysical processes and plasma shielding in the formation of a stationary laser erosion plume.

Негизги сөздөр: лазердик нурлануу; лазердик эрозиялык факел; үзгүлтүксүз CO_2-лазер; факелдин температурасы; буулардын басымы; бийиктик боюнча бөлүштүрүлүшү; буулардын ылдамдыгы; лазер-плазмалык процесстер.

Ключевые слова: лазерное излучение; лазерный эрозионный факел; непрерывный CO_2-лазер; температура факела; давление паров; распределение по высоте; скорость паров; лазерно-плазменные процессы.

Keywords: laser radiation; laser erosion plume; continuous CO_2 laser; plume temperature; vapor pressure; height distribution; vapor velocity; laser-plasma processes.

Взаимодействие лазерного излучения с веществом имеет многогранный характер и отличается многообразием процессов, что обусловливает их широкое применение в различных научных и практических областях [1–5]. Для дальнейшего расширения сферы применения лазерных технологий и оптимизации технологических процессов необходимо детальное изучение физических механизмов, определяющих специфику лазерного воздействия на вещество [6]. Это в значительной степени связано со сложностью и многообразием процессов взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с материалами, ярким примером чего является неустойчивость системы «ЛИ – мишень – лазерная плазма». Существующие модели, описывающие различные механизмы указанных процессов, как правило, недостаточно согласуются между собой. Кроме того, такие модели либо позволяют получать лишь оценочные значения параметров, либо жёстко привязаны к конкретным экспериментальным условиям и применимы только в ограничённых диапазонах изменения параметров. В связи с этим актуальной задачей остаётся разработка обобщённой теоретической модели взаимодействия лазерного излучения с веществом [3; 6–8].

Различные аспекты взаимодействия лазерного излучения с веществом находят широкое применение как в практических задачах, так и в фундаментальных исследованиях. Одним из таких аспектов являются теплофизические процессы формирования лазерного эрозионного факела в зоне лазерного воздействия на материалы. В частности, лазерная плазма используется в качестве источника эмиссионного спектрального анализа [9], для получения атомарных потоков вещества при формировании топологических структур в микроэлектронике, синтеза наноструктур [10] и в ряде других приложений.

В связи с этим актуальными являются как экспериментальные, так и теоретические исследования лазерной плазмы. В настоящей работе представлены результаты изучения одной из её разновидностей - лазерного эрозионного факела материалов, формирующегося при взаимодействии лазерного излучения относительно невысокой интенсивности с различными материалами [11].

Целью данной работы является исследование лазерного эрозионного факела материалов и определение его параметров на основе экспериментальных данных.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ экспериментальных исследований процессов формирования лазерного эрозионного факела металлов и выбор модели для расчёта его параметров.

2. Определение температуры основания лазерного эрозионного факела в зависимости от интенсивности лазерного излучения.

3. Расчёт зависимости температуры основания лазерного эрозионного факела от энерговклада лазерного излучения.

Экспериментальные исследования лазерного эрозионного факела (ЛЭФ) представлены в работах [9–15]. В настоящей работе кратко рассмотрены их основные результаты, на основе которых предпринята попытка выявить доминирующие теплофизические факторы формирования и существования стационарного ЛЭФ металлов. В частности, экспериментально исследована зависимость температуры ЛЭФ от различных режимов облучения. В качестве варьируемых параметров использовались диаметр лазерного пучка и скорость сканирования лазерного излучения. Установлено, что ЛЭФ состоит из двух областей: внутренней, представляющей собой плотную высокотемпературную зону, и внешней, состоящей из прозрачных паров облучаемого материала. Теплофизические процессы в зоне воздействия в значительной степени определяются температурой внутренней области ЛЭФ. На основе анализа экспериментальных зависимостей температуры ЛЭФ от энерговклада непрерывного лазерного излучения показан пороговый характер этих зависимостей. Данное обстоятельство объясняется поглощением лазерного излучения во внутренней области ЛЭФ, его развитием (увеличением размеров и появлением внешней области), а также просветлением факела при возрастании интенсивности лазерного излучения [11].

В экспериментальных исследованиях для облучения образцов использовался непрерывный CO_2-лазер с длиной волны 10,6 мкм и выходной мощностью до 700 Вт. Экспериментальная установка предназначалась для измерения температуры лазерного факела Тф (рис. 1). Излучение CO_2-лазера (1) мощностью P = 500–700 Вт (2) фокусировалось линзой из KCl (3) на стальной образец (5) размерами 18 × 15 × 0,5 см, на поверхности которого формировался лазерный факел (4). Измерение яркостной температуры лазерного факела осуществлялось с помощью оптического пирометра ОППИР-17 (7).

Изменение режимов лазерного облучения обеспечивалось варьированием диаметра лазерного пучка (d) на поверхности образца, а также скорости его перемещения (v), задаваемой реверсивным столиком МПУ-1 (6). Устройство МПУ-1 обеспечивало вращение образца с постоянной угловой скоростью ω = v/Rл, где Rл - радиус окружности, описываемой лазерным лучом на поверхности образца. Скорость перемещения образца, определяемая соотношением v = ωRл, изменялась в диапазоне 0–6,75 мм/с при фиксированных значениях диаметра пучка d = 0,5–2,2 мм.

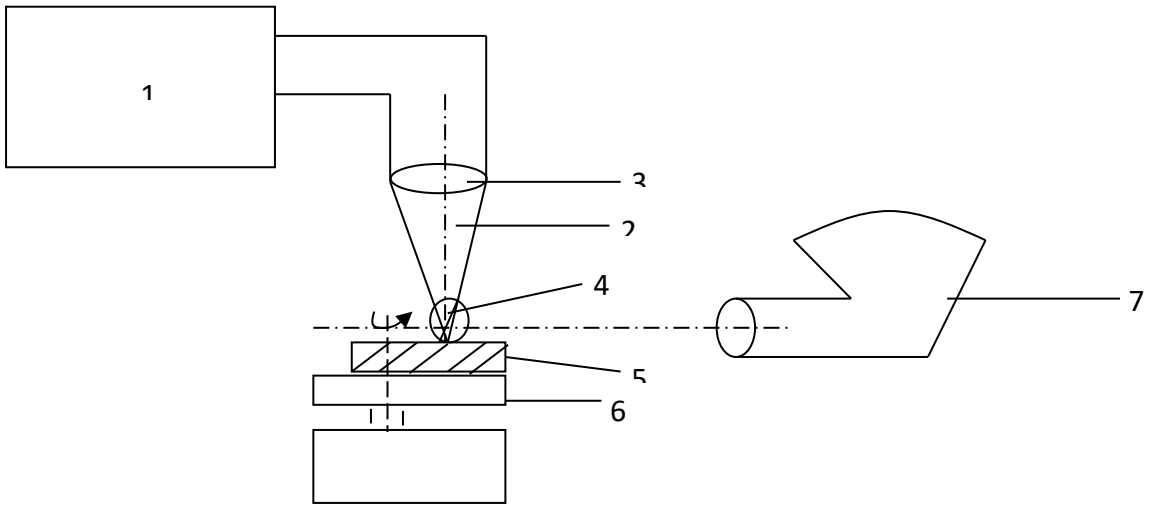


Рис. 1. Схема эксперимента

Интенсивность сканирующего ЛИ на поверхности образца рассчитывалась по формуле:

$$I = \frac{p}{\pi d^2 + dv^2} . \quad (1)$$

Для интервала $I = 2 \cdot 10^4 - 2{,}2 \cdot 10^5 \, Вт / см^2$, относительная ошибка составляет, соответственно, $\delta_I = 0{,}12 - 0{,}16.$

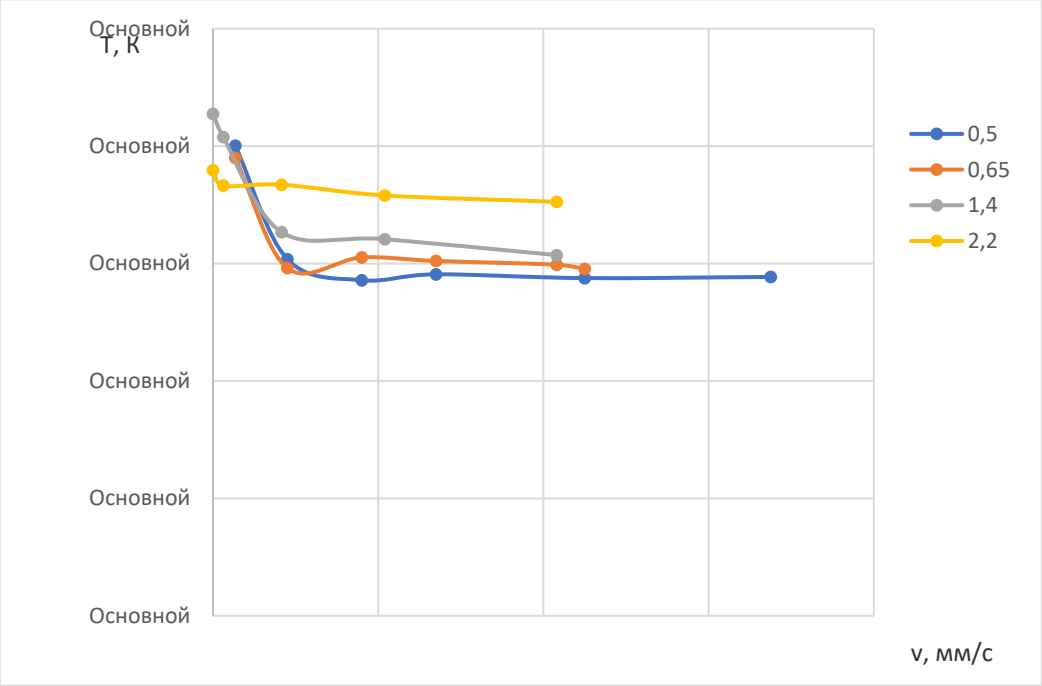


Рис. 2. Зависимость T(*v*) при различных d: • -0,5; • -0,65; • – 1,4; • -2,2 мм.

Измерение температуры проводилось методом совмещения нити лампы пирометра с фоном излучения нагретого тела. В качестве диагностируемой области рассматривалось основание лазерного факела, представляющее собой плотную среду, состоящую из паровой и жидкокапельной фаз. Спектроскопические исследования выявили наличие интенсивного сплошного излучения в области основания факела, что позволяет обоснованно применять оптический пирометр для определения яркостной температуры лазерного факела. Считывание показаний по шкале пирометра ОПИИР-17, проградуированной в температурных единицах, осуществлялось в момент исчезновения изображения нити на фоне излучения основания лазерного факела. Для пересчёта измеренных яркостных температур $T_я$ на

длине волны 0,65 мкм в термодинамическую температуру лазерного факела $T_ф$ использовалось следующее соотношение [15]:

$$\frac{1}{T_я} - \frac{1}{T_ф} = \frac{\lambda}{B} \ln \frac{1}{Э_{\lambda T}}$$

здесь, B = 1,438 см • град.; $Э_{\lambda T}$ - коэффициент серости, равный для

стали 0,8. Откуда

$$T_Ф = \frac{1}{\frac{1}{T_я} + \frac{\lambda}{B} \ln Э_{\lambda,T}}$$

Статистическая обработка результатов дает ошибку измерения впределах ±(40÷60) при $T_ф$=1400÷2000 К.

Поскольку в реальных условиях процессы взаимодействия лазерного излучения с материалами сопровождаются перемещением образцов, а различные режимы обработки реализуются за счёт изменения скорости их движения v и диаметра пятна лазерного пучка d на поверхности, в данной работе рассматривается влияние скорости v на температуру в зоне воздействия при фиксированных значениях d. Измеряемая в экспериментах температура соответствует температуре основания лазерного факела, формирующегося в результате взаимодействия паров, испаряющихся со дна каверны, и мелкодисперсных жидкокапельных частиц со сфокусированным потоком лазерного излучения. Эта область представляет собой наиболее ярко светящуюся часть лазерного факела и характеризуется максимальной температурой в зоне воздействия.

В связи с этим теплофизические процессы взаимодействия непрерывного лазерного излучения с мишенью определяются температурой основания лазерного факела $T_ф(v)$, что и обусловило выбор данного параметра в качестве основного объекта исследования. Экспериментально полученные характерные зависимости $T_ф(v)$ при различных значениях d приведены на рис. 2. Как видно, при начальных, близких к нулю, значениях скорости v температура $T_ф$ резко уменьшается. Визуальные наблюдения показывают, что в этом режиме происходит сокращение размеров лазерного эрозионного факела: уменьшаются высота и диаметр его внешней области, тогда как размеры внутренней области - основания факела - изменяются незначительно. При достижении некоторой критической скорости $v_{кр}$ температура $T_ф$ стабилизируется, что сопровождается изменением структуры факела и формированием начального участка плато устойчивости. В начале области плато устойчивости происходит исчезновение внешней части факела, после чего наблюдается уменьшение диаметра его внутренней области. При этом установившееся значение температуры оказывается тем выше, чем больше диаметр пятна лазерного излучения d. Указанные процессы отражают обратную кинетику формирования лазерного факела.

Для анализа физических механизмов, наблюдаемых в эксперименте, целесообразно рассмотреть зависимость температуры лазерного факела от энергетических параметров лазерного излучения. В случае непрерывных лазеров таким параметром, как правило, является интенсивность ЛИ I. В связи с этим на основе экспериментальных зависимостей $T_ф(v)$ были получены зависимости $T_ф(I)$ (рис. 3). При этом использовались следующие соображения. Интенсивность лазерного излучения определяется выражением

$I=p/S$, где p - мощность лазерного излучения, S - площадь, на которую распределяется лазерный поток. В случае круглого сечения лазерного пучка, перемещающегося по поверхности образца со скоростью v, имеем:

$S = S_0 + S^*$

где S_o - площадь неподвижного пятна диаметром d; S^* - площадь на которое распределяется мощность p при движении со скоростью v в единицу времени и $S^* = L \cdot d$, где L – путь, пройденный лазерным лучом в единицу времени и численно равное v. Отсюда, имеем:

$I = p/((\pi \cdot d^2/4) + vd)$.

На основе данного выражения были получены зависимости $T_ф(I)$, рис. 3. Наличие “плато стабильности” в некотором интервале $I = I_{кр1} - I_{кр2}$, вероятно соответствует процесам формирования ЛФ. По мере увеличения I, при $I > I_{кр1,}$ образуется и растет в размераз плотная внутренняя область ЛФ, затем формируется внешняя область ЛФ, состоящая из паров и мелкодисперсных частиц. При $I > I_{кр2}$, начинается резкий рост температуры основания ЛФ. Если фокусировка ЛИ низкая и диаметр потока ЛИ большое и не позволяет достичь больших I (например, при d = 2,2 мм, d = 1,4 мм) при фиксированной мощности ЛИ, то значения I не достигают вышеуказанного интервала и внешняя область ЛФ не образуется, а температура $T_ф$ монотонно растет.

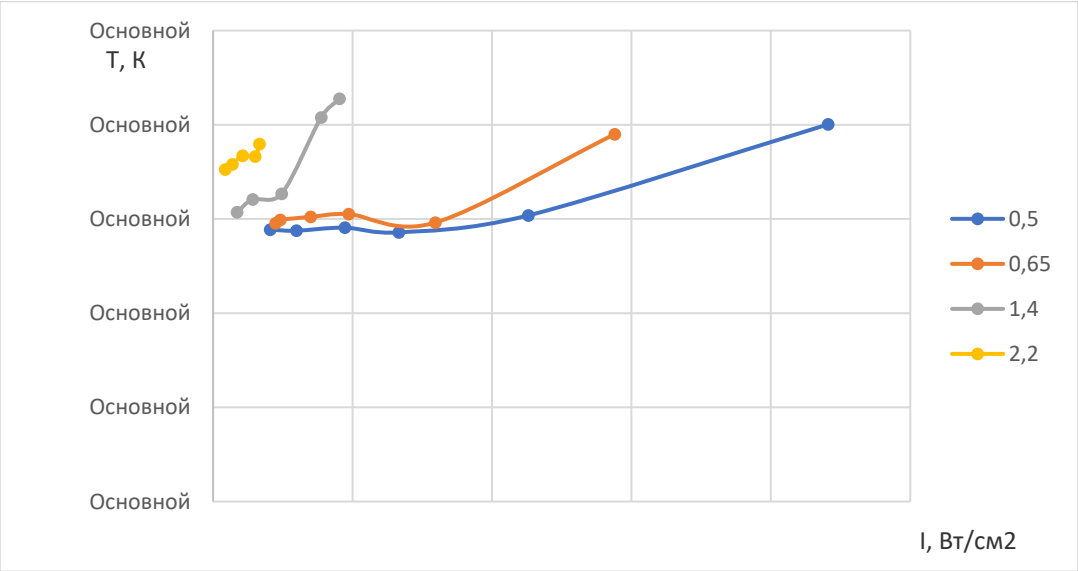


Рис. 3. Экспериментальные зависимости Т*(I)* при различных d

Таким образом, в зависимости $T_ф(I)$ отсутствует так называемое «плато стабильности». Из этого следует, что формирование лазерного факела определяется главным образом интенсивностью лазерного излучения, а не температурой основания факела. Можно предположить, что стабилизация температуры обусловлена перераспределением приращиваемой энергии лазерного излучения при $I>I_{кр1}$ на формирование внешней области факела. Основными каналами энергозатрат при этом являются: расход энергии на скрытую теплоту плавления и рост внутренней области факела, затраты на испарение со дна каверны, а также потери энергии, связанные с поглощением излучения парами и мелкодисперсными частицами факела. Однако данные процессы носят пороговый характер и при достижении $I_{кр2}$ выходят на режим насыщения. Иными словами, объем внутренней области факела достигает необходимой величины, процесс испарения стабилизируется, температура факела выравнивается, а пары факела становятся более прозрачными. В результате дальнейшее увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к резкому росту температуры факела. Как известно из литературы [3], превышение температуры факела над температурой плавления материала (для стали $T_{пл}$=1400–1500 К) вызывает её быстрый рост вплоть до температуры кипения. Вероятно, величина критического интервала интенсивности, соответствующая режиму эффективного экранирования факелом, в первую очередь определяется мощностью лазерного излучения и параметрами облучаемого образца. В целом процессы формирования лазерного факела отличаются высокой сложностью и включают совокупность взаимосвязанных и взаимозависимых явлений. В условиях непрерывного лазерного излучения умеренной интенсивности в инфракрасном диапазоне к ним относятся плавление и испарение в зоне воздействия, поглощение лазерного излучения парами и экранирование испаряющейся поверхности, ионизация паров с последующим образованием плазмы и другие процессы. днако ключевым остаётся тот факт, что формирование лазерного факела приводит к снижению температуры в зоне облучения, и при рассматриваемых экспериментальных условиях влияние лазерного факела на температуру поверхности облучаемого образца $T_п$ имеет пороговый характер. В первом приближении допустимо считать, что температура основания лазерного факела приблизительно равна температуре зоны облучения на поверхности образца, то есть $T_ф \approx T_п$.

$$T(t,x) = T_H + \left(\frac{I_0 \cdot a}{\lambda\sqrt{\pi}}\right) arctg\left(\frac{2\sqrt{\chi t}}{a}\right), (2)$$

Здесь I_0 - интенсивность излучения в центре облучаемого пятна с гауссовым радиусом a, $T_н$ - начальная температура металла, ǽ, χ - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, соответственно.

Для теоретического описания рассматриваемых процессов обратимся к результатам работ [8; 16]. В указанных исследованиях получено стационарное распределение температуры, формируемое гауссовым пучком непрерывного излучения, перемещающимся по поверхности полубесконечного тела. Известное решение уравнения теплопроводности при постоянных коэффициентах приводит к выражению для температуры поверхности в центре гауссова пучка в виде зависимости [11; 17]:

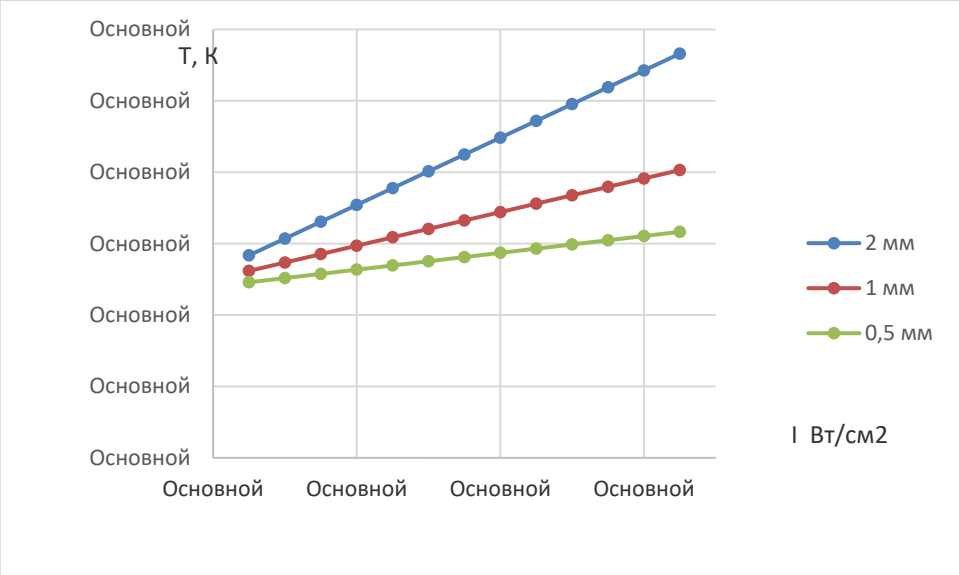


Рис. 4. Зависимость температуры зоны воздействия от интенсивности ЛИ при различных диаметрах лазерного пучка

В проведённых экспериментах характерные размеры диаметра лазерного пучка на поверхности образца находились в диапазоне *a=0,1-3,0 мм*, что соответствует 0,1-3,0·10^{-3} м. Из экспериментальных зависимостей Тф (I), путем их экстраполяции до вертикальной оси, можно найти вероятные значения Тн = 1200 – 1300 К. Учитывая свойства функции arctg, что при аргументе, стремящемся к бесконечности arctg(∞) =π/2, который соответствует выходу на стационарный режим процесса образование лазерного эрозионного факела, на основе выражени (2) можно получить зависимости Тф (I) при различных размерах потока лазерного излучения на поверхности образца а, рис. 4.

Как видно из рис. 3. и 4. в целом экспериментальные и теоретические зависимости имеют качественное согласие и показывают, что с увеличением интенсивности ЛИ температура зоны воздействия и основания ЛЭФ увеличивается линейно. Для более детального соответствия необходимо учет многообразия факторов, влияющих на процессы взаимодействия лазерного излучения с образцами. Но полученные теоретические зависимости достаточны для составления общей картины образования ЛЭФ и для расчета её параметров.

На основе проделанной работы сделаны следующие выводы:

1. Проведен анализ экспериментальных исследований процессов образования лазерного эрозионного факела металлов и на основе этого анализа выбраны модели для аналитического расчет параметров лазерного эрозионного факела.
2. Рассчитана зависимость температуры основания лазерного эрозионного факела от интенсивности лазерного излучения. Экстраполяция зависимости температуры зоны облучения от интенсивности падающего ЛИ, с точки зрения существующих теоретических моделей с учетом условий эксперимента и порового её характера, дало удовлетворительное совпадение [11].

Список использованной литературы

1. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. – М.: Мир, 1981. – 638 с.

2. Анисимов С.И., Имас А.Я., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 206 с.
4. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 495 с.
5. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989. – 280 с.
6. Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Д.Д. и др. Воздействие лазерного излучения на материалы. – М.: Наука, 1989. – 367 с.
7. Usenkanov Dzh., Bakirova N.M. Stabilization the electric arc plasma flow by its own magnetic field. – 2024. – URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85208983950&origin=resultslist
8. Usenkanov Dzh., Bakirova N.M., Bakirova E. Simulation of the Interaction of an Electric Arc with a Weld Pool. – 2025. – URL: https://www.scopus.com/pages/publications/105023643473?origin=resultslist
9. Ошемков С.В., Петров А.А. Спектральный анализ с лазерной атомизацией пробы: обзор // ЖПС. – 1985. – Т. 43. – № 3. – С. 359–376.
10.Жерихин А.Н. Лазерное напыление тонких пленок // Итоги науки и техники. Серия: Современные проблемы лазерной физики. – М.: ВИНИТИ, 1990. – 107 с.
11.Жунушев А. Магистерская диссертация. – Бишкек: КНУ им. Ж. Баласагына, кафедра электроники и наноэлектроники, 2025.
12.Токтогонов С.А., Мурзакулова И.Ч. Ток, проходящий через факел при наложении внешнего сильного электрического поля // Вестник КНУ. – 2018. – Вып. 4. – С. 69–76.
13.Токтогонов С.А., Мурзакулова И.Ч., Осмоналиева А.А. Лазерно-электроразрядное воздействие на кремниевые пластины // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2017. – № 5. – С. 17–21.
14.Токтогонов С.А., Токторбаев Э.М., Молдонасиров Р.Б. Формирование каверны на поверхности металлов при изменении условий фокусировки лазерного излучения // Вестник КРСУ. – 2019. – Т. 19. – № 12. – С. 37–40.
15.Токтогонов С.А., Мурзакулова И.Ч., Осмоналиева А.А. Лазерно-электроразрядное воздействие на кремниевые пластины // Вестник ТУ «Дастан». – 1997. – С. 114–117.
16.Гордов А.П. Основы пирометрии. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
17.Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Об особенностях кинжального режима проплавления движущимся лучом // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8. – № 2. – С. 448–451.
18.Найт Ч.Дж. Теоретическое моделирование быстрого поверхностного испарения при наличии противодавления // Ракетная техника и космонавтика. – 1979. – Т. 17. – № 5. – С. 81–86.

Рецензент: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Хайдаров К.

УДК: 539.184
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-366-371

Осконбаев М.Ч., Тайиров М.М., Таирова Г.Р.
Ош мамлекеттик университети,
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Осконбаев М.Ч.,[1] Тайиров М.М.,[2] Таирова Г.Р.[1]
Ошский государственный университет,[1]
КНУ имени Жусупа Баласагына[2]
Oskonbaev M.Ch., Taiirov M.M., Tairova G.R.
Osh State University,