

УДК 620.193.6

**ФОРМИРОВАНИЕ КАВЕРНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

С.А. Токтогонов, Э.М. Токторбаев, Р.Б. Молдонасиров

Исследовано влияние условий фокусировки лазерного излучения на процессы образования каверны на поверхности металлического образца, облучаемого лазерным излучением (ЛИ). Получены зависимости размеров каверны от расположения радиуса каустики потока лазерного излучения относительно поверхности образца.

Ключевые слова: лазерное излучение; интенсивность; радиус каустики; каверна; лазерный факел (ЛФ); фокусировка.

**ЛАЗЕРДИК НУРЛАНУУНУН ФОКУСТОО ШАРТТАРЫН ӨЗГӨРТҮҮДӨ
МЕТАЛЛДЫН БЕТИНДЕГИ ОЮКТУН КАЛЫПТАНУУСУ**

С.А. Токтогонов, Э.М. Токторбаев, Р.Б. Молдонасиров

Бул макалада лазер нуру менен нурландырылган металл үлгүлөрүнүн бетиндеги оюктардын калыптануусуна лазердик нурлануунун фокустоо шарттарынын таасири изилдөөгө алынган. Оюктун өлчөмдөрүнүн үлгүнүн бетине салыштырмалуу жайгашкан лазердик нурлануунун агымынын каустикасынын радиусунан болгон көз карандылыгы алынган.

Түйүндүү сөздөр: лазердик нурлануу; интенсивдүүлүк; каустиканын радиусу; оюк; лазер факели; фокустоо.

**FORMATION OF A CAVERN ON THE METAL SURFACE
WHEN CHANGING THE CONDITIONS OF FOCUSING LASER RADIATION**

S.A. Toktogonov, E.M. Toktorbaev, R.B. Moldonasirov

The effect of laser radiation focusing conditions on cavern formation processes on the surface of a metal sample irradiated with laser radiation (LR) has been investigated. There are obtained dependence of cavern dimensions on location of laser radiation flux caustic radius relative to the sample surface.

Keywords: laser light; intensity; caustic radius; cavity; laser torch; focusing.

Общая теория взаимодействия лазерного излучения с веществом дает возможность построения аналитических моделей для ряда задач, проведения аналитических и численных анализов, а также предлагает качественные теории образования рельефа на обрабатываемой поверхности и т. п. [1–5]. Однако сложность и многообразие физической картины этого явления, а также потребности практики постоянно поддерживают высокую активность исследований в этом направлении [6, 7].

Многообразие и взаимообусловленность процессов взаимодействия ЛИ с веществами создает не только трудности в построении единой картины, но и дают возможности реализации различным путям оптимизации, фиксируя одни параметры и варьируя другие. Одним из таких способов является изменение условий фокусировки ЛИ на поверхности образца [8–10].

Цель данной работы – исследование влияния условий фокусировки лазерного излучения

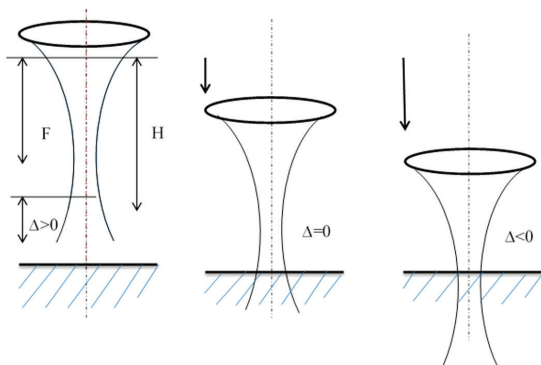


Рисунок 1 – Схема расположения пространственной конфигурации сфокусированного потока ЛИ относительно поверхности образца

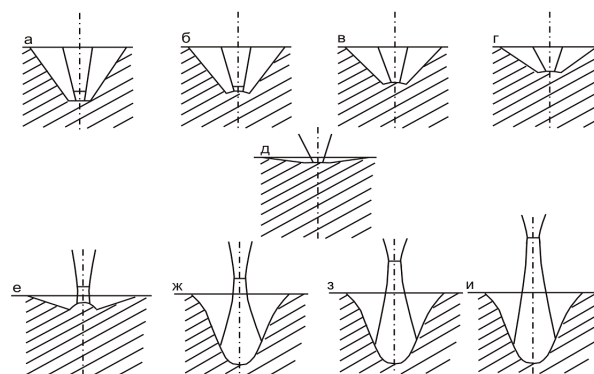


Рисунок 2 – Профили лунок при различных условиях фокусировки в зависимости от Δ : а – 0,8; б – 0,6; в – 0,4; г – 0,2; д – 0,0; е – 0,2; ж – 0,4; з – 0,6; и – 0,8 см

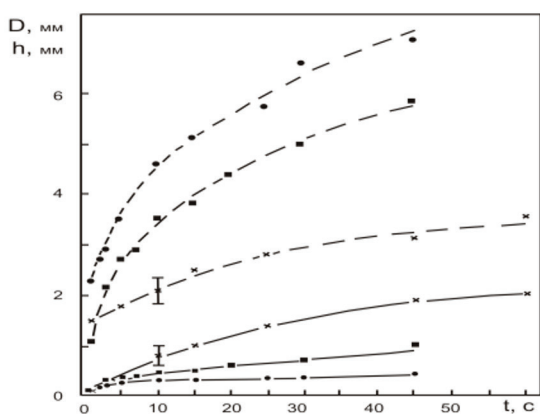


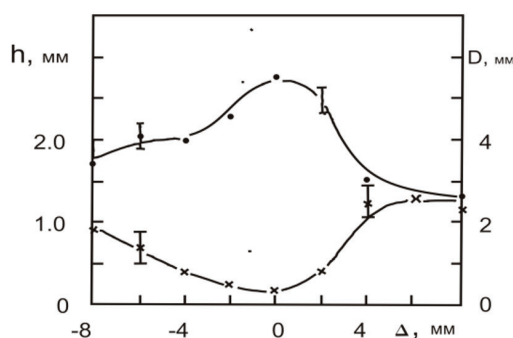
Рисунок 3 – Временные зависимости D (---) и h (—) при различных Δ : $\Delta = 0$; \blacksquare – (-4); \times – 8 мм

на процессы образования каверны на поверхности металлического образца, облучаемого непрерывным лазерным излучением.

В экспериментах для облучения образцов использовали непрерывный CO_2 -лазер мощностью до 300 Вт с длиной волны излучения 10,6 мкм. В качестве образцов служили стальные бруски с размерами $18 \times 15 \times 0,5$ см, что позволяло не учитывать краевые эффекты. Фокусное расстояние F линзы равнялось 19,8 см. При проведении экспериментов меняли расстояние от линзы до поверхности образца H с шагом 0,2 мм. Относительная ошибка определения интенсивности ЛИ I для интервала $I = 2 \cdot 10^4 \div 2,2 \cdot 10^5$ Вт/см² составила $\delta_I = 0,12 \div 0,16$.

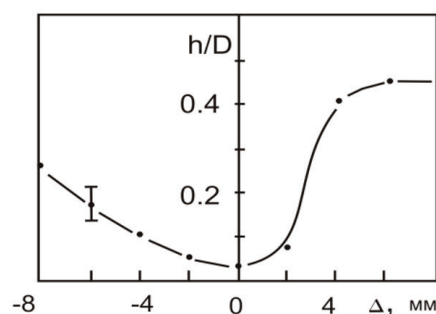
В схеме на рисунке 1 показаны пространственные конфигурации потока ЛИ относительно поверхности образца, где $\Delta = H - F$. Размеры каверн измеряли на микроскопе МБР-1: диаметр (D) – по шкале на окуляре микроскопа, а глубину (h) определяли путем наведения резкости на дно лунки и на поверхность образца. Статистическая обработка результатов показала, что относительная ошибка измерения диаметра $\delta_d = 5\%$ и глубины $\delta_h = 20\%$.

На рисунке 2 приведены профили лунок при различных условиях фокусировки ЛИ. Зависимости диаметра D и глубины h каверны от Δ приведены на рисунке 3, где $\Delta = H - F$; H – расстояние между поверхностями линзы и образца; F – фокусное расстояние линзы, $F = 19,8$ см. Время экспозиции выбирали из экспериментальных зависимостей $h(t)$ и $D(t)$ (рисунок 4), откуда видно, что характерное время установления D и h составляет $t = 20$ с. Как видно на этих рисунках, наибольшие значения D и наименьшие значения h наблюдаются при нахождении точки фокуса (корректнее, области каустики) потока ЛИ на поверхности образца, при $\Delta = 0$. А при продвижении области каустики вглубь образца (при $\Delta < 0$) и подъеме над её поверхностью (при $\Delta > 0$) наблюдается увеличение h и уменьшение D . Следует заметить, этот факт сильнее выражен при $\Delta > 0$, но затем процесс насыщается, и значения h и D выравниваются. В случае $\Delta < 0$, в исследуемых условиях, установление размеров каверны не происходит.

Рисунок 4 – Зависимости $h(x)$ и $D(\cdot)$ лунки от Δ

Обычно в литературе при оценке размеров каверны определяющим параметром считают интенсивность ЛИ, в качестве которого берется интенсивность на поверхности образца. Но, как видно из приведенных выше результатов экспериментов, её увеличение не всегда приводит к адекватному увеличению глубины каверны. Более того, в случае, когда $\Delta = 0$ и интенсивность лазерного излучения I максимальна на поверхности образца, h меньше чем при $\Delta > 0$ или $\Delta < 0$. Это обстоятельство находится в противоречии с традиционным мнением о механизме их формирования.

Основной причиной этого является неоднозначность и взаимообусловленность процессов взаимодействия с веществами, которая в нашем случае выражается в активном влиянии процессов образования ЛФ на формирование лунки на поверхности образца. Вероятно, как это было отмечено в [11], в исследуемом диапазоне интенсивностей ($1 < 5 \cdot 10^5$ Вт/см) процессы образования ЛФ обуславливают пороговый характер температуры в зоне воздействия и, тем самым, процессы формирования каверны. Действие этого фактора заключается в следующем. При $\Delta = 0$ над поверхностью образца формируется развитая структура ЛФ, плотная внутренняя область которой эффективно экранирует поверхность образца и взаимодействуя с менее интенсивным потоком ЛИ, чем на поверхности, не просветляется. Это обстоятельство приводит к рассеянию энергии ЛИ в плотной внутренней области ЛФ и оттоку тепла в горизонтальном направлении, а также к уширению лунки за счет гидродинамического давления в зоне. В то же время из-за ослабления прошедшего к поверх-

Рисунок 5 – Зависимость отношения глубины h лунки к её диаметру D от Δ

ности ЛИ углубление лунки затормаживается, что приводит к небольшим значениям h .

В случае, когда фокус находится над поверхностью образца, ЛФ развит несильно, т. е. плотность и размеры его невелики. К тому же внутренняя плотная область ЛФ попадает в более интенсивный поток ЛИ, что способствует её просветлению и на поверхность образца проходит значительная часть потока. Это обстоятельство приводит к увеличению глубины каверны и в то же время, из-за меньшей развитости ЛФ (в первую очередь из-за малых размеров внутренней части) и незначительного оттока тепла в горизонтальном направлении, диаметр каверны уменьшается. Но при дальнейшем повышении точки фокусировки над поверхностью образца, она уходит от плотной части ЛФ и эффект просветления уменьшается. Это приводит к стабилизации размеров каверны, что показано на рисунке 4 (правая ветвь).

При $\Delta < 0$, когда радиус каустики потока ЛИ находится под поверхностью образца в её объеме, т. е. когда в начале процесса облучения поток ЛИ на поверхности имеет меньшую I (чем при $\Delta = 0$), соответственно, образуется менее развитый ЛФ. По мере продвижения фронта испарения каверны интенсивность ЛИ, достигающая её, растет. Это обстоятельство приводит к эффективному углублению каверны, но в то же время отток тепла в горизонтальном направлении уменьшается, что приводит к уменьшению диаметра каверны. По мере углубления лунки ЛИ встречает все большее поглощение при прохождении вдоль канала лунки, начинает заметно ослабляться к моменту достижения дна и эффективность углубления падает.

Для оценки полученных результатов с точки зрения практического применения были найдены зависимости параметра кинжалности h/D в от Δ . Как видно на рисунке 5, наибольшее h/D получается при $\Delta = 4$ мм и наименьшее при $\Delta = 0$. При $\Delta < 0$ также наблюдаем увеличение h/D . Следовательно, для увеличения кинжалности каверны необходимо выбирать режимы, когда $\Delta > 0$, область каустики потока ЛИ должна совпадать с плотной непрозрачной зоной ЛФ. А наиболее непригодным для этих целей является режим фокусировки точно на поверхность образца. При фокусировке вглубь образца также имеется некоторая возможность увеличения h , так как в этом случае h зависит от Δ . Но, вероятно, чрезмерное увеличение Δ не будет обеспечивать соответствующего увеличения h , так как ЛИ будет ослабляться в канале каверны, т. е. этот процесс является пороговым.

Таким образом, можно констатировать, что размеры каверны, образующиеся на поверхности образца под действием непрерывного лазерного излучения, кроме всего прочего, определяются расположением области каустики сфокусированного потока лазерного излучения относительно поверхности образца. И казалось бы очевидный факт, что острая фокусировка потока лазерного излучения, а именно, на поверхность облучаемого образца, не всегда приводит к увеличению глубины каверны и росту “кинжалности”. В практических случаях следует учитывать взаимодействие лазерного факела на формирование каверны.

Литература

1. Реди Дж. Промышленные применения лазеров / Дж. Реди. М.: Мир, 1981. 638 с.
2. Анисимов С.И. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, А.Я. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко. М.: Наука, 1970. 272 с.
3. Веденов А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А.А. Веденов, Г.Г. Гладуш. М.: Энергоатомиздат, 1985. 206 с.
4. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / Н.Б. Делоне. М.: Наука, 1989. 280 с.
5. Вейко В.П. Лазерные технологии в задачах и примерах: учеб. пособие / В.П. Вейко, Е.А. Шахно. СПб.: Ун-т ИТМО, 2014. 88 с.
6. Климов Ю.М. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: учебное пособие / Ю.М. Климов, В.С. Майоров, М.В. Хорошев. М.: МИИГАиК, 2014. 108 с.
7. Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе / под ред. В.Я. Панченко. М.: Интерконтакт Наука, 2009. 266 с.
8. Dowden J. A mathematical investigation of the penetration depth in key-hole welding with CW CO₂-laser / J. Dowden, P. Kapadia // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2252–2261.
9. Арутюнян Р.В. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Д.Д. Большов и др. М.: Наука, 1989. 367 с.
10. Точилкин В.А. К оценке влияния диаметра фокального пятна на глубину и форму пароголового канала при лучевой сварке / В.А. Точилкин // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 6. С. 7–11.
11. Токтогонов С.А. О факторах, формулирующих каверну на поверхности образца при совместном действии лазерного излучения и сильного электрического поля / С.А. Токтогонов, Э.С. Чокоев // Вестник КГНУ. 1997. Вып. 1. С. 102–106.