



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ДЛЯ РЕЗКИ И СВАРКИ

В. П. ГАРАЩУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Получено аналитическое выражение глубины резкости через постоянную преобразования пучка и угол его сходимости при допущении, что каустическая поверхность сфокусированного пучка имеет форму однополостного гиперboloида вращения. Для практического использования полученного соотношения приведены формулы постоянной преобразования пучка применяемых на практике резонаторов и лазеров.

Ключевые слова: лазерная сварка, лазерная резка, фокусировка, лазерный пучок, постоянная преобразования пучка, глубина резкости

В лазерных термических технологиях обработки материалов технологически важными характеристиками лазерного излучения являются не только его мощность, но и способность фокусироваться до малых размеров с помощью длиннофокусных объектов с большой глубиной резкости. Под последней будем понимать длину сфокусированного пучка в окрестностях его горловины, в пределах которой площадь его сечения изменяется незначительно. Глубина резкости $2l_R$ в работе [1], где она названа длиной Рэлея, определена как расстояние между сечениями сфокусированного пучка, площадь которых в 2 раза больше площади сечения горловины. Очевидно, чем больше глубина резкости при равных мощности пучка и площади сечения горловины, тем глубже проплавление металла при сварке, если режим проплавления глубокий; при резке толщина разрезаемого материала больше, а стенки реза имеют меньшее заокругление; при других лазерных процессах требования к точности фокусировки снижаются.

В приближении параксиальной оптики, которое при работе с лазерным излучением практически выполняется, глубина резкости определяется комплексным параметром светового пучка

$$Q = nuh, \quad (1)$$

где n — показатель преломления среды, в которой сфокусирован пучок; u — угол между крайним лучом в сходящемся сфокусированном пучке и главной оптической осью (угол сходимости); $2h$ — размер горловины, если же она имеет осевую симметрию, то ее радиус $r(0) = h$ (рисунок). Для данного пучка значение Q постоянно при всех его преобразованиях оптическими системами. Этот параметр одни авторы называют инвариантом Лагранжа–Гельмгольца [2], другие — инвариантом Смита–Гельмгольца [3], хотя к его вы-

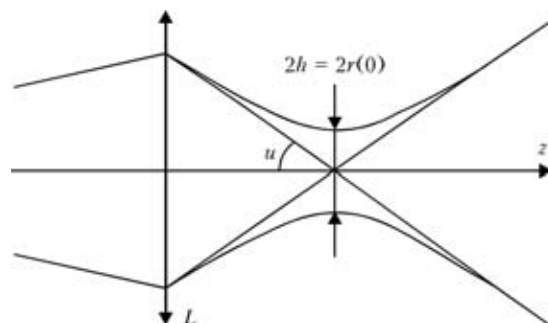
воду имеют отношение и другие авторы [3]. В иностранных литературных источниках этот параметр называют произведением параметров пучка, а мы предлагаем термин «постоянная преобразования пучка». Поскольку большинство лазерных технологий выполняется на воздухе, то показатель преломления $n = 1$, соотношение (1) упрощается:

$$Q = uh.$$

Целью настоящей работы является получение аналитической зависимости глубины резкости сфокусированного пучка от постоянной преобразования.

Для определения глубины резкости примем, что каустическая поверхность сфокусированного пучка, как и лазерного пучка, сформированного в устойчивом резонаторе, имеет форму однополостного гиперboloида вращения, у которого радиус горловины и угол наклона асимптоты равны соответственно радиусу горловины $r(0)$ и углу сходимости u сфокусированного пучка. По-видимому, такой гиперboloид должен достаточно точно описывать реальную каустическую поверхность.

Для решения этой задачи воспользуемся цилиндрической системой координат. Пусть световой пучок распространяется вдоль оси z , а изменение радиуса пучка отражает координата r . Примем, что распределение интенсивности по радиусу пучка не зависит от азимута. Тогда каустическая поверхность сфокусированного пучка будет описываться



Сфокусированный лазерный пучок: L — фокусирующий объектив

$$\frac{r^2(z)}{r^2(0)} = 1 + \frac{z^2}{b^2},$$

где b — параметр, который необходимо определить. Воспользуемся критерием глубины резкости, принятым в работе [1]. Тогда будет справедливо равенство $2l_R = 2b$. Из свойств гиперболы следует

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{r(z)}{r(0)} = \frac{z}{b},$$

откуда $\frac{r(z)}{z} = u = \frac{r(0)}{b}$ и $b = \frac{r(0)}{u}$. Умножив числитель и знаменатель на u , получим искомое выражение

$$b = \frac{r(0)}{u} \frac{u}{u} \equiv \frac{Q}{u^2}, \quad (2)$$

из которого, используя угол сходимости сфокусированного пучка и постоянную преобразования пучка данного лазера, можно вычислить глубину резкости $2b$. Последняя, как правило, имеется в паспортных данных лазера. Угол u легко определить экспериментально как отношение радиуса термограммы пучка на фокусирующем элементе $r(z_\phi)$ к расстоянию от него до горловины сфокусированного пучка z_r , которое практически равно фокусному расстоянию f фокусирующего элемента. Тогда уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$b = \frac{Q}{u^2} = \frac{Qf^2}{r^2(z_\phi)}. \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) следует, что глубина резкости тем больше, чем больше радиус горловины и постоянная преобразования, которая пропорциональна квадрату фокусного расстояния фокусирующего объектива и обратно пропорциональна квадрату радиуса пучка в нем.

Полученные соотношения позволяют предвидеть изменение геометрических параметров реза или проплавления в случае обработки длинномерных изделий, например, с использованием декартового манипулятора, в котором фокусирующий объектив перемещается относительно неподвижного изделия. Как правило, при распространении лазерного пучка в пространстве его радиус увеличивается. Следовательно, при самом близком по отношению к лазеру положении фокусирующего объектива глубина резкости сфокусированного пучка будет больше, чем при самом дальнем, что, безусловно, скажется на параметрах обработки. Будут ли такие изменения в пределах допуска зависеть от угла расходимости лазерного пучка, а именно, чем он меньше, тем меньше отличаются

зоны обработки в крайних положениях фокусирующего объектива манипулятора.

Для практического использования соотношения (2) ниже приведены аналитические выражения для постоянной преобразования пучка известных в практике резонаторов и лазеров.

В работе [1] дано выражение для постоянной преобразования лазерного пучка, сформированного в устойчивом резонаторе, моды TEM_{00}

$$Q_{00} = \theta w_{00} = \lambda / \pi,$$

где $\theta \equiv u$; $w_{00} \equiv h$; λ — длина волны излучения. В работе [4] показано, что постоянная преобразования лазерного пучка моды TEM_{pq} для круглых зеркал равна

$$Q_{pq} = Q_{00}(2p + q + 1),$$

здесь p и q индексы моды.

Для пучка, сформированного в неустойчивом резонаторе с выводом его мимо круглого зеркала (что наиболее распространено), постоянная преобразования составляет

$$Q \approx 0,55\lambda M / (M - 1), \quad (4)$$

где M — увеличение резонатора.

Лазерный пучок, сформированный в одиночном волокне волоконного лазера с диаметром световолокна $d_c < 10\lambda$ характеризуется постоянной преобразования

$$Q \approx 0,25\lambda,$$

а для пучка, переданного по световолокну,

$$Q \leq 0,5 A_N d_c,$$

где $A_N = \sqrt{n_c^2 - n_o^2}$ — его числовая апертура; n_c и n_o — показатели преломления соответственно сердцевины и оболочки.

В последние годы мощность щелевых лазеров достигла значений в несколько киловатт. Этого вполне достаточно для выполнения лазерных термических технологий. Лазерный пучок на выходе из резонатора имеет в поперечном сечении форму вытянутого прямоугольника. С помощью оптической системы его форма преобразуется в квадратную или круглую. Такой пучок характеризуется постоянной преобразования, которую можно описать соотношением (4), где $M = \infty$; тогда (4) будет иметь вид

$$Q = 0,61\lambda. \quad (5)$$

Среди технологических лазеров значительную часть составляют многопучковые лазеры, в которых для достижения большей мощности лазерного пучка объединяют множество пучков меньшей мощности, например CO_2 -лазеры [5], а также по-



лупроводниковые [1] и волоконные [6]. Отдельные пучки могут быть когерентными или некогерентными между собой. При фокусировке таких составных пучков тождественными фокусирующими системами получены различные радиусы горловины сфокусированного пучка, такой же интенсивности как на его оси, а также средние по сечению горловины.

При выводе формулы для определения постоянной преобразования многопучкового лазера примем, что оси всех составляющих пучков строго параллельны между собой и их расходимость равна. В лазерах, предназначенных для непосредственного использования в термических технологиях, составляющие пучки располагаются так, чтобы составной пучок имел минимальные поперечные размеры. При вычислении радиуса горловины сфокусированного составного пучка и его интенсивности примем, что фокусное расстояние F фокусирующего элемента будет не менее чем в 5 раз больше диаметра D составного пучка, т. е. $F \leq 5D$. Выполнение этого условия минимизирует влияние сферической аберрации.

Случай 1. Составляющие пучки некогерентны между собой. Пусть составляющие пучки генерируются лазером, работающим в волноводном режиме, а диаметр активного элемента составляет $2a$. Тогда половина угла расходимости отдельного пучка $\alpha = 0,61\lambda/a$, а радиус горловины сфокусированного пучка, составленного из множества некогерентных пучков, равен

$$r^{\text{HK}}(0) = \alpha F \equiv h. \quad (6)$$

При этом угол $u = D/2F$. Следовательно, постоянная преобразования составного пучка будет

$$Q = r^{\text{HK}}u = 0,61\lambda D/2a.$$

Отношение $D/2a = \sqrt{N}$, где N — количество источников в наборе. Окончательно

$$Q = 0,61\lambda\sqrt{N}.$$

Случай 2. Составляющие пучки когерентны между собой. Горловина сфокусированного составного пучка является результатом интерференции сфокусированных составляющих пучков. Простое соотношение типа (6) для составного пучка отсутствует. Поэтому для вычисления радиуса

пучка воспользуемся выражениями для средней интенсивности сфокусированного пучка в горловине. Как следует из работы [2], интенсивность суммарного излучения от некогерентных источников света I_{Σ}^{HK} равна сумме интенсивностей отдельных источников $I_{\Sigma}^{\text{HK}} = NI_1$, где I_1 — интенсивность, создаваемая световым пучком отдельного лазера. Для когерентных источников суммарная интенсивность I_{Σ}^{K} равна квадрату числа составляющих пучков $I_{\Sigma}^{\text{K}} = N^2I_1$ или $I_{\Sigma}^{\text{K}} = NI_{\Sigma}^{\text{HK}}$. Если суммарная мощность обоих составных пучках (когерентных и некогерентных) одинакова, то радиус горловины для когерентных пучков можно описать соотношением

$$r^{\text{K}}(0) = \frac{1}{\sqrt{N}} r^{\text{HK}}(0).$$

Тогда постоянная преобразования будет

$$Q = r^{\text{K}}(0)u = \frac{1}{\sqrt{N}} r^{\text{HK}}(0)u = 0,61\lambda,$$

т. е. совпадает с (5). Строго говоря, соотношение $I_{\Sigma}^{\text{K}} = N^2I_1$ не выполняется, поскольку при интерференции дифрагирующих на апертуре отдельных лазеров пучков возникнут дополнительные боковые лепестки, а при фокусировке боковые максимумы — горловины, что подтверждается в работе [7]. Очевидно, их интенсивность тем меньше, чем меньше составляющих пучков и больше их диаметр $2a$. Положение боковых максимумов определяется законом расположения составляющих пучков в составном пучке.

1. *Einfuehrung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung.* — Hamburg: Rofin, 2002. — 144 S.
2. *Ландсберг Г. С.* Оптика. — М.: Наука, 1976. — 926 с.
3. *Бори М., Вольф Е.* Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
4. *Гарацук В. П.* Основы фізики лазерів. Лазери для термічних технологій: Навчальний посібник. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005. — 244 с.
5. *Технологические лазеры:* Справ. в 2 т. / Под ред. Г. А. Абилюсинова. — М.: Машиностроение, 1991. — Т. 1. — 432 с.
6. *Накатани Х.* Разработка мощных волоконных лазеров и их применение // Свароч. техника. — 2004. — № 3. — С. 108–114.
7. *Hergenhan G., Schull M., Brauch U.* Kohaerente Vertikalemitter — Agrays // Laser Opto. — 2001. — 33, № 3. — S. 68–75.

An analytical expression of cutting depth was derived through the constant of beam transformation and its angle of convergence with the assumption that the caustic surface of the focused beam has the shape of a single-cavity hyperboloid of revolution. For practical use of the derived relationship, formulas of the constant of beam conversion in resonators and lasers applied in practice are given.

Поступила в редакцию 20.02.2006