УДК 669.721.5:621.791.947.2

Ю.Н. Кульчин[1], Е.П. Субботин[1], А.И. Никитин[1], Д.С. Пивоваров[1], Д.С. Яцко[1]

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МАГНИЕВЫХ ОТЛИВОК

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-25-29

Представлены результаты экспериментального исследования процесса лазерного резания элементов литниково-питающей системы отливок из магниевого сплава. Численно исследованы и апробированы параметры мощного лазерного излучения для резки литниковой системы, прибылей, заливов металла, которые образуются по месту разъема полуформ. Определены необходимые и достаточные условия для отсутствия возгорания отрезаемого материала и заготовки в процессе лазерной резки.

Ключевые слова: *магниевые сплавы, лазерная резка, литники.*

The results of an experimental study of the process of laser cutting of elements of a sprue-feeding system of magnesium alloy castings are presented. Parameters of high-power laser radiation for cutting the sprue system, profits, metal loadings, which are formed at the location of the half-mold connector are numerically researched and tested. The necessary and sufficient conditions for the absence of ignition of the cut material and workpiece during the laser cutting process are determined.

Key words: *magnesium alloys, laser cutting, sprues.*

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук [Federal State Budgetary Institute of Science Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]; e-mail: director@iacp.dvo.ru

Введение

Использование лазеров в составе промышленных роботизированных комплексов – одно из наиболее производительных и перспективных направлений обработки материалов, которое находит широкое практическое применение и фактически становится базовым процессом в таких отраслях, как авиация, автомобилестроение и судостроение. На протяжении последнего десятилетия в России и за рубежом проводятся экспериментальные и численные исследования фундаментальных механизмов лазерной и газолазерной резки различных конструкционных материалов [1]. Лазерная резка магниевых сплавов излучением волоконных лазеров имеет свои характерные особенности, связанные с оптическими и теплофизическими характеристиками материала: низкой поглощательной способностью магния для излучения с длиной волны 1,0 мкм, большой теплопроводностью, высокой химической активностью, склонностью металла к воспламенению при нагреве. Поэтому в промышленности данный способ обработки изделий из магниевых сплавов применяется весьма редко. Например, в процессе производства медицинских стентов и небольших пластин (толщиной от 1 до 3 мм) из магниевого сплава AZ31 (США) используются как волоконные, так и CO_2 лазеры [2]. Тем не менее процесс лазерной резки массивных материалов из магниевых сплавов, требующий высокой плотности мощности лазерного пучка, представляет определенный интерес при изготовлении деталей сложных форм методом литья.

Цель данной работы – исследование процессов взаимодействия непрерывного лазерного излучения большой мощности с элементами деталей машиностроения сложной формы, изготовленными из магниевого сплава, обладающего пожароопасными свойствами, и определение необходимых и достаточных условий для отсутствия возгорания отрезаемого материала и заготовки в процессе лазерной резки.

Методика проведения исследований

Лазерное резание металлов осуществляется с помощью специальных лазерных оптических головок (ЛОГ) [3]. Однако при эксплуатации серийно выпускаемых ЛОГ предполагается, что разделение металла (резка, раскрой) происходит за один проход сфокусированного лазерного пучка по заданной траектории на поверхности детали. Традиционно, в зависимости от геометрической формы и физико-механических свойств обрабатываемой детали рассчитываются значения определяющих параметров: мощность лазерного излучения, состав и расход технологических газов, скорость процесса резания.

В проведенных экспериментальных исследованиях использовали лазерный технологический комплекс в составе: волоконный лазер ЛС-1-К в

комплекте с оптической головкой IPGP FLW-D50V, промышленный робот KUKA KR-30 HA в комплекте с поворотно-наклонным позиционером KUKA DKP-400, система подачи технологических газов в зону резки.

Исследования проводили на детали цилиндрической формы – прямой круговой цилиндр диаметром 44±2 мм, высотой 112±3 мм из магниевого сплава МЛ5пч. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Исследование процессов взаимодействия непрерывного лазерного излучения большой мощности с деталью, изготовленной из магниевого сплава, проводили в два этапа. Первоначально определяли геометрические параметры канала реза и на основании полученных результатов создавали специальную систему подачи технологических газов в зону резки для ее установки на серийно выпускаемую оптическую головку IPGP FLW-D50V в комплекте с фокусирующей линзой 250 мм (рабочая дистанция 187 мм).

На втором этапе исследований рассчитывали условия резки образца из магниевого сплава (табл. 1), такие как плотность мощности падающего лазерного излучения, скорость движения сфокусированного лазерного пучка по обрабатываемой поверхности, параметры защитной среды из технологических газов и их смесей.

Результаты и обсуждение

Параметрами, определяющими форму поперечного сечения, ширину и глубину реза, получаемого в результате взаимодействия лазерного пучка с металлом (для волоконных лазеров, работающих в непрерывном режиме излучения, поляризация – случайная), являются:

– мощность непрерывного лазерного излучения;

– диаметр транспортного волокна;

– параметры оптической системы формирования гомоцентрического или слабостигматического пучка, влияющие на его минимальный диаметр перетяжки и углы расходимости;

– скорость перемещения пучка;

– давление и расход технологического газа, при этом существенное значение имеет диаметр сопла для подачи технологического газа в зону плавления металла;

– коэффициент поглощения лазерного излучения обрабатываемым материалом;

– физико-механические свойства и геометрические размеры обрабатываемой детали.

Для волоконного лазера ЛС-1-К, кабеля рабочего волокна диаметром 200 мкм и оптической головки IPGP FLW-D50V, используемых в экспериментальных исследованиях, пространственно-энергетические параметры лазерного излучения схематично проиллюстрированы на рис. 1 [4].

Таблица 1

Химический состав сплавов МЛ5 и МЛ5пч

Сплав	Содержание элементов*, % (по массе)									
	Al	Mn	Zn	Si	Fe	Ni	Cu	Be	Zr	Прочее
МЛ5	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	0,25	0,06	0,01	0,1	0,002	0,002	0,1
МЛ5пч	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	0,08	0,007	0,001	0,04	0,002	0,002	–

* Остальное – магний.

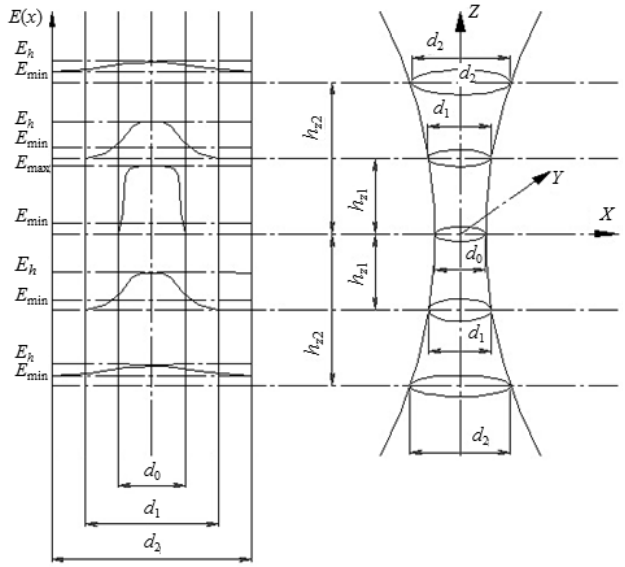

Рис. 1. Пространственно-энергетические параметры распространения лазерного пучка: *E* – плотность мощности; *d* – диаметр лазерного пучка (протяженность распределения мощности в поперечном сечении пучка с продольной координатой *z* вдоль главной оси)

На этапе определения геометрических параметров реза, получаемого в результате взаимодействия лазерного пучка с металлом, с учетом того, что номинальная выходная мощность лазера ЛС-1-К не может быть >1000 Вт, а начальная температура обрабатываемой поверхности должна быть как можно ближе к температуре процесса резки, рассмотрены варианты местоположения диаметра пучка в перетяжке d_0 относительно поверхности обрабатываемой детали (рис. 2).

С учетом размеров обрабатываемой детали и угла расходимости пучка в оптической системе IPGP FLW-D50V, равного 0,0349 радиан, известным способом [4] определен диаметр радиально-симметрического пучка лазерного излучения d_2 на расстоянии h_{z2}=22 мм (рис. 1) от местоположения перетяжки пучка:

$$d_2^2 = d_0^2 + h_z^2 \cdot \upsilon^2, \qquad (1)$$

где d_0 – диаметр пучка в перетяжке; h_z – местоположение пучка d_2 вдоль оси z; υ – угол расходимости пучка в дальней зоне.

Таким образом, при полном отрезании части детали цилиндрической формы диаметр пучка на поверхности детали d_2 определен равным 2,4 мм.

На основании полученных результатов, с учетом диаметра обрабатываемой детали, для исследования процесса лазерного резания элементов литниково-питающей системы, отливок из магниевого сплава МЛ5пч создано специальное устройство подачи технологических газов в зону реза (рис. 3) и установлено на серийно выпускаемую оптическую головку IPGP FLW-D50.

Поскольку экспериментальные исследования были направлены на определение необходимых и достаточных условий для отсутствия возгорания отрезаемого материала и заготовки в процессе

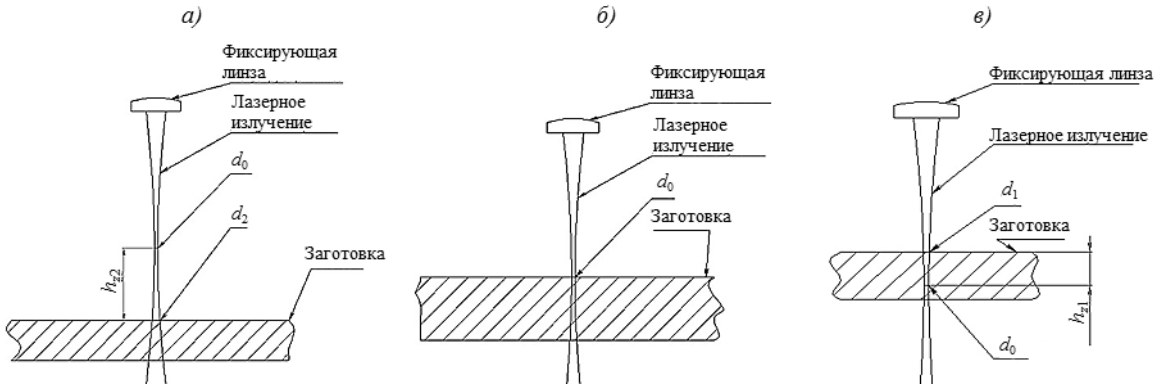

Рис. 2. Варианты местоположения диаметра пучка в перетяжке d_0 относительно поверхности обрабатываемой детали:
а – d_0 находится выше поверхности обрабатываемой детали; *б* – d_0 находится на поверхности обрабатываемой детали; *в* – d_0 находится ниже поверхности обрабатываемой детали (заготовки)

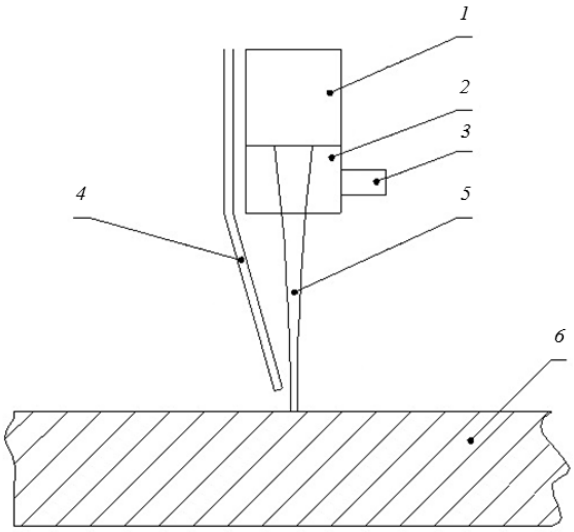

Рис. 3. Устройство подачи технологических газов в зону реза:
1 − оптическая головка IPGP FLW-D50; *2* − блок пневматической защиты оптики ЛОГ (использован из комплекта внеосевой наплавочной насадки PRECITEC); *3* − трубка подачи защитного газа (аргона); *4* − трубка подачи режущего газа (внутренний диаметр 2,0±0,2 мм); *5* − лазерный пучок; *6* − обрабатываемая деталь

лазерного резания металла, склонного к воспламенению при нагреве, на данном этапе исследований проблемы, связанные с качеством резки, не рассматривались.

Расчетная максимальная плотность мощности падающего лазерного излучения в области фокусировки составляет E_c^0=2263,5 Вт/мм^2. Измеренное значение мощности непрерывного излучения в области фокусировки для сфокусированного пучка радиусом w_0=0,375 мм, направленного перпендикулярно к поверхности металла, составляет G_m^0=1051,5 Вт.

Для проведения эксперимента установлен температурный диапазон для центра ванны расплава магниевого сплава МЛ5пч: 900÷1500 К, т. е. ΔT=600 К [5].

В экспериментальных исследованиях диапазон температур выбран с учетом потерь лазерной энергии на прогрев материала в процессах движения расплава в твердом металле и теплопереноса в геометрически сложной области с двумя подвижными границами, одна из которых является границей плавления, а другая – свободная поверхность раздела «жидкость–газ». В процессе лазерной резки интенсивность поглощения излучения на поверхности металла составляет порядка 10^3 Вт/мм^2 [6].

С учетом параметров непрерывного излучения волоконного лазера и установленной для проведения эксперимента средней температуры (для центра ванны расплава) в процессе резки T_s≈1300 К, рассчитана скорость движения сфокусированного лазерного пучка V_b по обрабатываемой поверхности [7]:

$$V_b \approx \frac{4a}{w_0}\left[1+\frac{k}{E_c^0(1\text{-}R)w_0}(T_i\text{-}T_s)\right], \qquad (2)$$

где a – температуропроводность сплава МЛ5пч; w_0 – радиус сфокусированного лазерного пучка, направленного перпендикулярно к поверхности металла; k – теплопроводность магниевого сплава МЛ5пч; T_i – начальная температура обрабатываемой поверхности; T_s – средняя температура процесса резки; E_c^0 – плотность мощности падающего излучения; R – коэффициент отражения поверхности сплава МЛ5пч.

Расчетная скорость движения сфокусированного лазерного пучка по обрабатываемой поверхности (2) определена в диапазоне $1 \le V_b \le 5$ (мм/с) для начальной температуры детали T_i=450 К. С учетом этого, в процессе подготовки проведения экспериментальных работ принято решение предварительно подогревать обрабатываемую поверхность лазерным пучком от комнатной температуры до установленной: T_i=450 К. Для этого плотность мощности лазерного пучка была уменьшена в 10 раз, а скорость его движения по поверхности детали увеличена в 50 раз: E_c' =226,3 Вт/мм^2, V_b' = 100 мм/с.

Для разрезаемого образца магниевого сплава в процессе эксперимента одно из главных требований к безопасности технологической операции заключалось в выборе таких условий резки элементов литниково-питающей системы, при которых отсутствует возгорание отрезаемого материала и заготовки. С этой целью в качестве рабочего (режущего) газа в экспериментальных исследованиях использовались инертные газы (аргон, гелий) и их смеси. В разработанном устройстве подачи технологического газа в зону расплава (рис. 3) струя режущего газа через сопло диаметром 2,0 мм подавалась на жидкий слой расплава, движущегося на фронте реза.

На основании анализа результатов численного моделирования струйных течений рабочих газов при лазерной резке металлов [6], определено давление рабочего инертного газа в диапазоне $0{,}5 \le P_g \le 0{,}7$ (МПа). В результате экспериментальных и численных исследований процесса резки установлены параметры динамического воздействия лазерного пучка на обрабатываемый материал, соответствующие оптимальному условию лазерной резки магниевого сплава МЛ5пч (табл. 2), по критерию отсутствия возгорания отрезаемого материала и заготовки.

Технологический процесс лазерного реза детали из магниевого сплава МЛ5пч состоял из трех этапов:

– проход №1 – первый оборот детали – подогрев обрабатываемой поверхности лазерным пучком до температуры T_i=450 К;

– проход №2 – второй оборот детали – начало процесса реза, перетяжка d_0 (1) находится на поверхности обрабатываемой детали (рис. 2, *б*);

– проход №3 – третий оборот детали – окончание процесса реза, перетяжка d_0 находится ниже поверхности обрабатываемой детали, на глубине 10,0±3,0 мм (рис. 2, *в*).

Таблица 2

Условия лазерной резки магниевого сплава МЛ5пч при отсутствии возгорания отрезаемого материала и заготовки

Номер оборота детали вокруг оси	Мощность лазерного излучения G_m, Вт	Скорость движения сфокусированного лазерного пучка V_b, мм/с	Давление режущего газа P_g, МПа
1	100	100	0,6
2–3	1000	2	0,6

В качестве режущего газа (рис. 3) использовали газовую смесь: 90% аргона+10% гелия. Для пневматической защиты оптики ЛОГ (рис. 3) в процессе экспериментальных исследований подавали защитный газ аргон.

На рис. 4 представлена фотография реального лазерного реза образца из магниевого сплава МЛ5пч цилиндрической формы диаметром 44 мм.

Рис. 4. Вид реального лазерного реза литника на образце из магниевого сплава МЛ5пч цилиндрической формы диаметром 44 мм

Лазерное резание металла производили за три оборота детали, закрепленной в патроне позиционера из комплекта робота-манипулятора. Возгорание материала – магниевого сплава – отсутствовало. Экспериментально установлено, что для мощности лазерного излучения 1000 Вт, радиуса лазерного пучка w_0=0,375 мм, при скорости движения сфокусированного лазерного пучка V_b=2 мм/с (2) по обрабатываемой поверхности, глубина реза (заглубление) за один проход составляет 10,0±3,0 мм для магниевого сплава МЛ5пч.

Выводы

1. По результатам расчета параметров канала реза создано специальное устройство подачи технологических газов в зону резки для его установки на серийно выпускаемую оптическую головку.

2. Рассчитаны условия и параметры резки детали цилиндрической формы из магниевого сплава, в том числе мощность лазерного излучения, скорость движения сфокусированного лазерного пучка по обрабатываемой поверхности детали, давление режущего газа.

3. Определено, что процесс лазерного резания детали должен начинаться после предварительного прогрева зоны предполагаемого реза в среде инертных газов лазерным пучком до начальной температуры 450 К – первый оборот детали вокруг оси.

4. С учетом того, что номинальная выходная мощность волоконного лазера, используемого при проведении экспериментальных исследований, не превышала 1000 Вт, резание лазерным пучком выполнялось в течение второго и третьего оборотов детали, причем после второго оборота фокус лазерного пучка и его минимальный диаметр в перетяжке перемещались в глубину детали на расчетное расстояние 10,0±3,0 мм.

Заключения

В результате исследования процессов взаимодействия непрерывного лазерного излучения большой мощности с элементами деталей машиностроения сложной формы, изготовленными из магниевого сплава МЛ5пч, определены необходимые и достаточные условия для отсутствия возгорания отрезаемого материала и заготовки в процессе лазерной резки. Использование полученных результатов в процессе экспериментальных исследований по определению возможности использования лазеров высокой мощности для резки элементов литниково-питающей системы из магниевых сплавов может стать одним из возможных решений модернизации процесса обработки заготовок в литейном производстве, а также задач адаптивного управления процессом лазерного резания в технологических системах металлообработки. Внедрение технологической операции лазерной резки магниевых сплавов в литейном производстве позволит осуществить вторичное использование отрезанных литников и повысить ресурсосберегающие показатели на предприятии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (государственный контракт 02.G25.31.0173 от 01.12.2015 г.) и гранта по программе «Дальний Восток» Федерального агентства научных организаций (номер проекта 15-I-4-048 от 29.10.2014 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Панченко В.Я., Васильцов В.В., Голубев В.С. и др. Лазерные технологии обработки материалов, создаваемые в ИПЛИТ РАН // Сб. тр. ИПЛИТ РАН. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 191.
2. Scintilla L.D., Tricarico L. Experimental investigation on fiber and CO_2 inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets // Optics & Laser Technology. 2013. Vol. 46. P. 42–52.
3. Богданов А.В., Голубенко Ю.В. Волоконные лазеры и их применение. СПб.: Лань, 2016. 208 с.
4. Иванов В.С., Золотаревский Ю.М., Котюк А.Ф. Основы оптической радиометрии. М.: Физматлит, 2003. 544 с.
5. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Материаловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 1999. 416 с.
6. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. М.: Физматлит, 2013. 256 с.
7. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973. 191 с.