

К. Ф. ЕРМАЛИЦКАЯ

ВЛИЯНИЕ «ТРЕТЬИХ» ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОСТУПЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ В ПЛАЗМУ, ВОЗБУЖДАЕМУЮ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

In this work the influence of third elements on dynamics of the processes in laser plasma was investigated. This plasma was excited by laser ablation of copper alloys with double laser pulses. To analyze processes which took place in the plasma we investigated influences of power density of laser pulses q on relative intensities of spectral lines.

Атомно-эмиссионный спектральный анализ является одним из наиболее распространенных способов исследования состава многокомпонентных сплавов. Несмотря на то что данному методу более 100 лет, до настоящего времени существует необходимость разработки новых и оптимизации уже существующих аналитических методик количественного анализа, дающих возможность снизить погрешность путем уменьшения влияния «третьих» элементов на относительную интенсивность спектральных линий основных компонентов сплава. Использование в качестве источника возбуждения спектра сдвоенных лазерных импульсов имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными источниками для атомно-эмиссионного анализа (например, в несколько раз возрастает относительная интенсивность спектральных линий элементов без увеличения уровня фона [1]). Однако до сих пор недостаточно хорошо изучено влияние «третьих» элементов на относительную интенсивность линий в лазерной плазме, связанную с неравномерностью поступления элементов сплавов в парогазовое облако при изменении параметров лазерного излучения. Рассматривая процессы поступления элементов в лазерную плазму, необходимо принимать во внимание тот факт, что мощное лазерное излучение, воздействующее на мишень, приводит к разогреву приповерхностных областей до критических температур [2]. В результате увеличивается скорость диффузии элементов. Данное обстоятельство можно игнорировать при спектральном анализе однокомпонентных мишеней, однако в образцах многокомпонентных сплавов происходящие на поверхности процессы приводят к изменению состава лазерной плазмы [3–5]. Особенно важно при разработке методик количественного анализа учитывать влияние изменения параметров лазерного излучения (плотности потока излучения, числа импульсов в точку, временного интервала между сдвоенными лазерными импульсами и др.) на относительные интенсивности спектральных линий различных элементов.

В данной работе изучена зависимость относительной интенсивности спектральных линий элементов, входящих в состав многокомпонентных сплавов, от плотности потока излучения. Значение q изменялось путем увеличения диаметра лазерного пятна на поверхности мишени, т. е. в результате расфокусировки f лазерного луча при фиксированной мощности лазерного импульса (рис. 1). Расфокусировка осуществлялась движением мишени вдоль оси лазерного луча с шагом 0,5 мм.

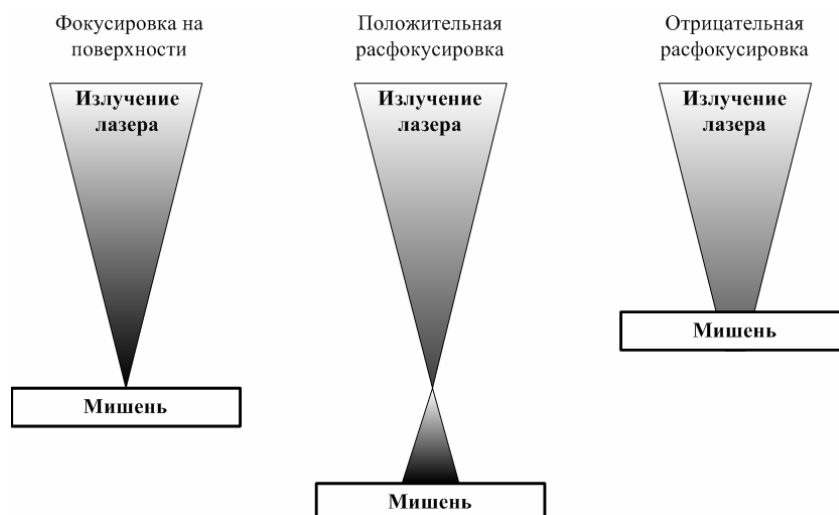


Рис. 1. Схематическое изображение различных схем фокусировки лазерного луча относительно поверхности мишени

Исследования проводились с использованием лазерного многоканального атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Источником возбуждения плазмы являлся двухимпульсный неодимовый лазер,

который может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов составляла 15 нс. Временной интервал между сдвоенными импульсами равнялся 10 мкс, энергия накачки лазера – 16 Дж, энергия импульса – 60 мДж [6]. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм, размер эрозионного пятна составляет $d=150$ мкм. Свечение плазмы поступало на входные щели двух спектрометров типа SDH-1. Регистрация спектра осуществлялась оптоэлектронным блоком на базе 3648-элементных ПЗС-линеек TCD 1304 AP (Toshiba). Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении.

Расфокусировка лазерного луча на поверхности мишени приводила к увеличению площади пятна и, как следствие, – к уменьшению плотности потока излучения q . Плотность потока излучения для сфокусированного лазерного луча составляла 10^{10} Вт/см². Зависимость q от значений расфокусировки лазерного луча приведена в табл. 1.

Таблица 1

Плотность потока излучения q на поверхности металлической мишени

$f, \text{ мм}$	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8
$q, \text{ Вт/см}^2$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,84 \cdot 10^9$	$7,44 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$2,49 \cdot 10^8$	$1,70 \cdot 10^8$	$1,23 \cdot 10^8$	$9,37 \cdot 10^7$	$7,35 \cdot 10^7$

Для исследования влияния «третьих» элементов на поступление вещества в лазерную плазму был проведен сравнительный анализ зависимостей относительных интенсивностей I наиболее сильной спектральной линии каждого элемента, входящего в состав образцов чистых металлов и многокомпонентных сплавов, от расфокусировки лазерного луча: 1) Cu $\lambda=324,754$ нм; 2) Zn $\lambda=334,502$ нм; 3) Al $\lambda=309,271$ нм; 4) Pb $\lambda=405,782$ нм; 5) Fe $\lambda=405,355$ нм.

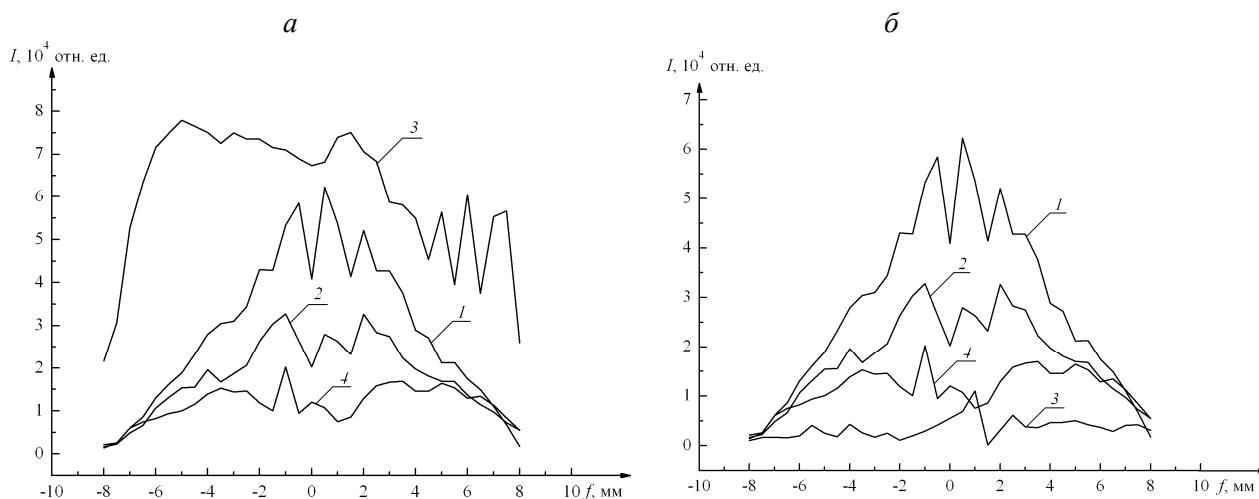


Рис. 2. Зависимость относительных интенсивностей спектральных линий меди (1), цинка (2), алюминия (3) и свинца (4) образцов чистых металлов (а) и стандартного образца латунного сплава № 160 (б) от расфокусировки лазерного луча на поверхности мишеней

Исследовались образцы меди, цинка, алюминия, свинца и железа; стандартные образцы латунных сплавов ЛС № 152, № 160 и образец дюралюминия Д16Т, содержание основных элементов в которых приведено в табл. 2. Зависимость относительных интенсивностей спектральных линий названных образцов чистых металлов и ЛС № 160 от расфокусировки лазерного луча на поверхности мишеней приведена на рис. 2.

Таблица 2

Среднее содержание элементов в стандартных образцах ЛС № 152, № 160 и дюралюминия Д16Т, %

Образец	Элемент			
	Pb	Al	Cu	Zn
152	1,07	0,387	60,81	36,3
160	2,45	0,118	73,90	22,3
Д16Т	–	92,0	4,51	–

Анализ приведенных зависимостей позволяет судить о процессах поступления элементов многокомпонентных сплавов в лазерную плазму. Так, из рис. 3 видно, что наличие в латунных сплавах «третьих» элементов не влияет на поступление в парогазовое облако меди и свинца, однако при больших плотностях потока излучения (f от -5 до $+5$ мм) возрастает скорость диффузии цинка внутри мишени и скорость поступления атомов этого элемента в лазерную плазму. Данный факт необходимо учитывать при проведении количественного анализа сплавов на медной основе. Существенные изменения претерпевает и зависимость относительной интенсивности спектральной линии алюминия. Так, если для мишени из чистого металла рост относительной интенсивности линии наблюдался при отрицательной расфокусировке, то в случае сплава увеличение I имело место при $f > 0$.

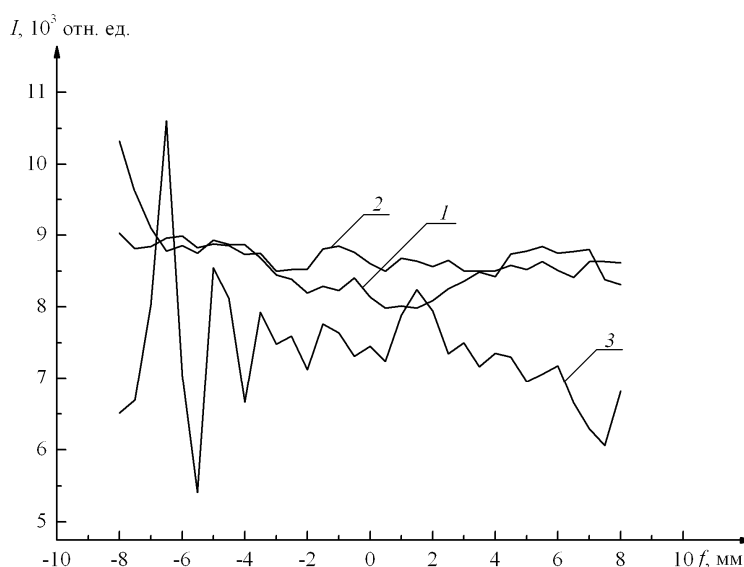


Рис. 3. Зависимость температуры плазмы образца чистой меди (1), стандартного образца латунных сплавов № 160 (2) и дюралюминия Д16Т (3) от расфокусировки лазерного луча на поверхности мишени

Исследование зависимости температуры плазмы T от расфокусировки лазерного излучения позволит сделать вывод о влиянии состава парогазового облака на такие его характеристики, как плотность и скорость расширения [5]. Температура лазерной плазмы определялась с помощью метода Орнштейна по относительным интенсивностям спектральных линий меди $\lambda=510,554$ нм и $\lambda=515,324$ нм:

$$T = \frac{11945}{1,826 + \lg(I_{510} / I_{515})}. \quad (1)$$

Зависимость температуры лазерной плазмы от значений расфокусировки лазерного луча на поверхности мишени для образцов чистой меди, стандартного образца ЛС № 160 и Д16Т приведена на рис. 3.

Из приведенных данных видно, что температура лазерной плазмы ЛС № 160 практически не зависит от плотности потока излучения q на поверхности мишени. Сравнивая полученную зависимость с аналогичными для образца чистой меди и Д16Т, можно сделать вывод, что температура плазмы при различных f определяется поступлением в парогазовое облако атомов различных элементов. Так, температура плазмы чистой меди минимальна при сфокусированном на поверхности лазерном луче. При расфокусировке, как положительной, так и отрицательной, T возрастает. Для образца дюралюминия, состоящего преимущественно из атомов Al, температура плазмы убывает с увеличением расфокусировки.

Для исследования влияния «третьих» элементов на процессы поступления в лазерную плазму атомов основы сплавов рассмотрим отношение интенсивностей спектральных линий W , зарегистрированных для однокомпонентных и многокомпонентных мишеней. Так, отношение интенсивностей линии Си образца чистого металла и стандартных образцов № 152 и № 160 остается постоянным и равно 1 при $|f| \leq 5$ мм. При уменьшении плотности потока излучения W убывает, что свидетельствует о поступлении в плазму сплава вместо меди «третьих» элементов. Однако W для меди и образца Д16Т имеет четко выраженный максимум при сфокусированном лазерном луче. Изменение расфокусировки приводит к падению отношения интенсивностей. Таким образом, для сплавов с содержанием меди не более нескольких процентов при больших плотностях потока излучения в лазерную плазму поступает преимущественно основной компонент сплава. Обратная картина наблюдается для цинка: благодаря высокой скорости диффузии при уменьшении q его количество в парогазовом облаке увеличивается.

В многокомпонентных латунных сплавах ЛС свинец и алюминий являются «третьими» элементами. Зависимости $W(f)$ этих элементов для стандартных образцов № 152 и № 160 не имеют максимумов и убывают линейно с увеличением f , что говорит о различном влиянии положительной и отрицательной расфокусировки на процессы поступления вещества сплавов в плазму и в конечном счете — на результаты количественного анализа.

Отношение интенсивностей спектральной линии алюминия, зарегистрированных для мишени из чистого металла и из дюралюминия, остается постоянным при всех значениях f . Это свидетельствует о том, что «третьи» элементы, входящие в состав Д16Т (магний, марганец и железо), а также медь не влияют на поступление в лазерную плазму алюминия. Алюминий, входящий в состав латуни, оказывает влияние на испарение основных компонентов сплавов – меди и цинка.

Количественный спектральный анализ многокомпонентных латунных сплавов при возбуждении спектров сдвоенными лазерными импульсами имеет ряд особенностей. Лазерная плазма, образовавшаяся после воздействия первого импульса, кроме отдельных атомов и ионов различных элементов содержит капли и частицы в конденсированной фазе. Второй лазерный импульс из пары сдвоенных взаимодействует не только с поверхностью исследуемого образца, но и с плазмой, дополнительно возбуждая атомы и испаряя частицы. Количественное соотношение отдельных атомов и мелкодисперсной твердо- и жидкокапельной фазы в эрозийном факеле зависит как от оптических и теплофизических свойств сплава, так и от свойств его индивидуальных элементов. Так, к примеру, для свинца температура плавления 620 К, температура кипения 2038 К, что значительно ниже аналогичных значений для меди. По-разному изменяется и скорость диффузии данных элементов с увеличением температуры приповерхностной области мишени. Результатом является существенное отличие зависимостей относительной интенсивности спектральных линий от плотности потока излучения, что говорит о несоответствии элементного состава лазерной плазмы и образца сплава.

Учет влияния «третьих» элементов на поступления основных компонентов сплавов в эрозионный факел позволит детально изучить механизмы лазерной абляции металлических мишеней сдвоенными лазерными импульсами и снизить погрешность количественного анализа данных объектов.

1. Сухов М. Т. // Лазерный спектральный анализ (физические принципы). Новосибирск, 1990.
2. Борискин А.И., Еременко В.М., Павленко П. А. и др. // Журн. техн. физики. 2004. Т. 74. Вып. 6.
3. Воробьев В.С. // УФН. 1993. Т. 63. № 12. С. 51.
4. Анисимов С. И., Лукьянчук Б.С. // Там же. 2002. Т. 172. № 3. С. 301.
5. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М. // Квант. электроника. 2003. 33. № 1. С. 57.
6. Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2008. № 3.

Поступила в редакцию 20.10.08.

Ксения Федоровна Ермалицкая – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии. Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Е.С. Воропай.