

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НИКЕЛЬ-ХРОМОВОГО СПЛАВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ

К.Ф. Зноско

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,  
ул. Ожешко 22, 230023 Гродно, Беларусь, znosko@rambler.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования влияния температуры никель-хромового сплава на интенсивность спектральных линий эрозионных плазменных факелов. Показано, что при воздействии сфокусированного лазерного излучения на поверхность исследуемого объекта, находящегося при температуре 20-500°C роста интенсивности спектральных линий не наблюдается, так как значительная часть его энергии идет на нагрев области фокусировки. При взаимодействии лазерного излучения с мишенью, находящейся при температуре 700-1000°C, эта доля значительно ниже и на плавление, парообразование и ионизацию материала мишени остается значительно больше энергии, что и приводит к росту аблированной массы и более чем двухкратному росту интенсивности спектральных линий эрозионной лазерной плазмы.

**Ключевые слова:** лазерно-эмиссионная плазма; эрозионный плазменный факел; межимпульсный интервал; температура мишени; интенсивность спектральной линии.

## INFLUENCE OF NICKEL-CHROME ALLOY TEMPERATURE ON THE INTENSITY OF THE SPECTRAL LINES EROSION PLASMA

K.F. Znosko

*Yanka Kupala State University of Grodno,  
22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, znosko@rambler.ru*

In this paper, an attempt is made to determine the effects of the temperature of an erosion crater on a nickel-chromium target after the first laser pulse is applied to the intensity of the spectral lines of the erosion plasma created by twin laser nanosecond pulses.

It is shown that the target surface temperature significantly affects the ablative removal of the material and the intensity of the spectral lines of the erosive plasma. When a focused laser pulse is applied to the surface of a nickel-chromium alloy target at a temperature of 20-500°C, no increase in the intensity of the spectral lines is observed. In this case, a significant part of the laser pulse energy is spent on heating the focus area on the target. When a laser pulse interacts with a target at a high temperature (700-1000°C), much less laser pulse energy is consumed for heating it. Its energy is spent on melting, vaporization, and ionization of the target material. This leads to an increase in the ablated mass and a more than twofold increase in the intensity of the spectral lines of the erosive laser plasma.

Thus, the increase in the intensity of the spectral lines of the erosive plasma, when it is formed by double laser pulses following with a delay relative to each other, is due to the high temperature of the target crater remaining after the impact of the first laser pulse. The lower the pulse interval, the higher the temperature. The estimated temperature of the erosion crater after the action of the first laser pulse after 1 microsecond, under the experimental conditions described above, was 600-700°C.

**Keywords:** laser ablation; two-pulse ablation; inter-pulse interval; material removal; erosion plasma flare; laser-emission plasma; dual laser pulses.

### Введение

Использование сдвоенных (парных) лазерных импульсов является распространенным методом формирования эрозионной плазмы, используемой в технологических процессах и при проведении спектрального анализа материалов, веществ и изделий [1-2]. Особенностью применения

сдвоенных импульсов является существенный рост интенсивности спектральных линий излучения эрозионной плазмы и рост аблированной массы вещества по сравнению с моноимпульсным ее формированием [3-4]. Однако причины такого роста интенсивности спектральных линий до конца не выяснены.

В работах [5-6] экспериментально показано значительное увеличение интенсивности спектральных линий и массы аблированного вещества при воздействии на Al- и Cu-пластинки сдвоенными лазерными импульсами при уменьшении межимпульсного интервала до  $\sim 1$  мкс. Это объясняется остаточным нагревом эрозионного кратера первым лазерным импульсом, который тем выше, чем меньше межимпульсный интервал.

В работе [7] показано, что инъекция горячей плазмы, образованной вторым лазерным импульсом, внутрь эрозионного факела, образованного первым лазерным импульсом, приводит к повторному испарению конденсирующегося вещества, вынесенного первым лазерным импульсом, возбуждению и ионизации его атомов, что в итоге приводит к росту интенсивности спектральных линий.

В работе [8] экспериментами по абляции нагретой до высокой температуры мишени подтверждена значительная роль остаточной температурой кратера, сформированного первым лазерным импульсом, на эффективность абляции сдвоенными импульсами и интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы.

В работе [9] обнаружено двухкратное увеличение эмиссии в присутствии приповерхностной плазмы, созданной непрерывным CO<sub>2</sub> лазером на железной мишени, показана необходимость учитывать увеличение абляции за счет разогрева поверхности объекта.

Целью настоящей работы является установление влияния начальной температуры никель-хромового сплава на интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы, созданной лазерными наносекундными импульсами.

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, методика исследований и пробоподготовка, описаны в [8, 10]. Излучение YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера, который мог работать как в режиме одиночных, так и в режиме сдвоенных

импульсов, следующих с регулируемой задержкой друг относительно друга, с длительностью импульсов  $\sim 15$  нс, фокусировалось на исследуемый объект. Излучение плазмы направлялось в монохроматор-спектрограф MS 2004i, в котором происходило выделение спектральных линий. Регистрация спектра лазерной эрозионной плазмы на выходе MS 2004i осуществлялась с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106.

Объектом исследования являлся никель-хромовый сплав, имеющий размеры  $3 \times 1 \times 100$  мм<sup>3</sup>. С помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Elvax определялся его химический состав. Основными его компонентами являлись: никель - 78% и хром - 20%. В микропримесях присутствовали железо, марганец, кобальт, ванадий и молибден.

Нагрев исследуемого образца осуществлялся путем пропускания электрического тока через него. Напряжение сети с помощью автотрансформатора понижалось до нескольких вольт. Низкое напряжение подводилось к исследуемому образцу. Под действием электрического тока он нагревался. Регулирование температуры образца осуществлялась путем изменения величины прикладываемого напряжения. Температура образца измерялась с помощью оптического измерителя температуры ИТ-ЗСМ.

### Результаты и их обсуждение

Регистрация спектров излучения плазменных факелов, сформированных на поверхности никель-хромового сплава при его температуре 20, 300, 500, 700, 850, 950, 1050 и 1150 градусов Цельсия в спектральном диапазоне 250-370 нм, проводилась по методике, аналогичной [8, 10]. Энергия одиночного импульса YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера на длине волны  $\lambda = 1.06$  мкм составляла 13 мДж. Был выбран ряд атомарных и ионных линий никеля и хрома и построены зависимости их интенсивности от температуры исследуемого образца, которые представлены на рис. 1.

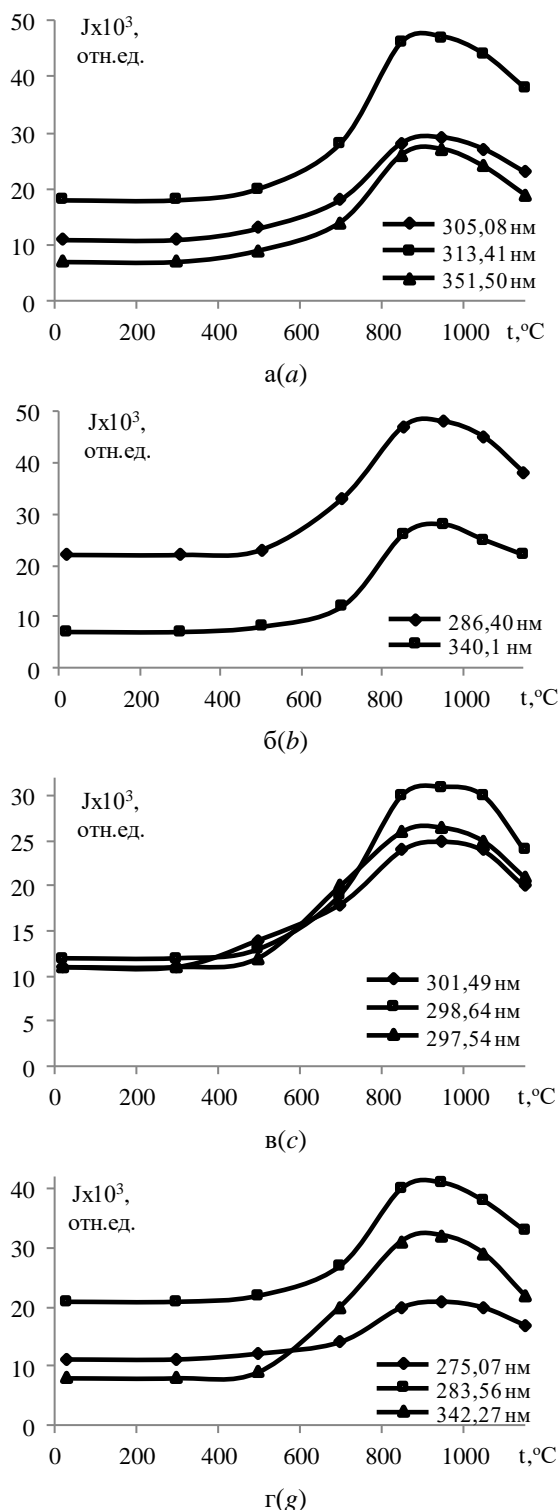


Рис. 1. Зависимости интенсивности спектральных линий атомов никеля (а), ионов никеля (б), атомов хрома (в) и ионов хрома (г) от температуры  
 Fig. 1. Dependences of the intensity of the spectral lines of nickel atoms (a), nickel ions (b), chromium atoms (c) and chromium ions (g) on the temperature

Как видно из рис. 1 температура исследуемого образца до 500°C практически не

влияет на интенсивность как атомных, так и ионных линий обоих химических элементов. Наличие высокой температуры образца начинает проявляться с 600°C. При подъеме температуры образца до 850°C интенсивность атомных спектральных линий никеля возрастала в 2.5-3 раза, атомных линий хрома в 2.5-4 раза, ионных линий, как никеля, так и хрома, возрастала в 2-4 раза. При температурах больших 950°C интенсивность как атомных, так и ионных линий обоих химических элементов начинает уменьшаться. При температуре 1150°C их уменьшение значительно. Нагрев образцов выше 1150°C не проводился в виду роста пластичности исследуемого сплава при приближении к температуре плавления, которая составляет ~1400°C.

Из этих экспериментов следует, что температура поверхности исследуемого образца оказывает значительное влияние на интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы. Хотя зависимости интенсивности спектральных линий атомов и ионов от температуры индивидуальны для каждого радиационного перехода, однако общим является рост интенсивности спектральных линий, как атомов, так и ионов никеля и хрома в температурном диапазоне 600-950°C.

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью образца, находящейся при низкой температуре (20-500°C), значительная часть его энергии затрачивается на нагрев области, в которую оно сфокусировано. При взаимодействии лазерного импульса с поверхностью, находящейся при высокой температуре (700-1000°C), эта доля значительно ниже и на плавление, парообразование и ионизацию остается значительно больше энергии, что и вызывает рост аблированной массы и, соответственно, рост интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы.

Также были проведены исследования спектров излучения эрозионной плазмы на «горячей» мишени при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами

на поверхности того самого образца никель-хромового сплава. Энергия сдвоенного лазерного импульса составляла 13.6 мДж, а межимпульсный интервал 1 мкс. Также наблюдалось увеличение интенсивности спектральных линий, однако, это происходило при температурах мишени на  $\sim 200^\circ\text{C}$  меньшей, чем при моноимпульсном формировании плазмы.

Находя значения интенсивностей спектральных линий никеля, хрома и их ионов при моноимпульсном формировании эрозионной плазмы на «горячем» образце, равные значениям интенсивностей этих же линий при двухимпульсном ее формировании при низких температурах (комнатной), можно оценить величину остаточной температуры эрозионного кратера после действия первого лазерного импульса в паре.

При воздействии на никель-хромовый сплав сдвоенными лазерными импульсами интенсивность линии NiI 313.41 нм составляла порядка 23000 отн.ед. при комнатной температуре. Такая же интенсивность при одноимпульсном формировании плазмы получалась при нагреве образца практически до  $\sim 600^\circ\text{C}$  (рис. 1а).

Интенсивность линии иона никеля NiII 286.40 нм при двухимпульсном формировании эрозионной плазмы при низких температурах составляла  $\sim 25000$  отн.ед., а при одноимпульсном ее формировании такая же интенсивность достигалась при температуре образца  $\sim 600^\circ\text{C}$  (рис. 1б).

Интенсивность атомной линии хрома CrI 297.54 нм при двухимпульсном формировании лазерной плазмы при низких температурах составляла  $\sim 13000$  отн.ед., а при моноимпульсном ее формировании такая же интенсивность наблюдалась при температуре около  $\sim 600^\circ\text{C}$  (рис. 1в).

Интенсивность спектральной линии иона хрома CrII 342.27 нм при двухимпульсном формировании плазмы при низких температурах составляла  $\sim 13000$  отн.ед., а при одноимпульсном ее формировании такая же интенсивность была при температуре образца  $\sim 600^\circ\text{C}$  (рис. 1г).

Используя такой подход для спектральных линий, представленных на рис. 1 в экспериментальных условиях, описанных выше, остаточная температура эрозионного кратера при двухимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы к моменту прихода второго импульса (через 1 мкс после воздействия первого) составляла порядка  $600-700^\circ\text{C}$ .

Уменьшение интенсивности линий эрозионной плазмы при температурах, больших  $1050^\circ\text{C}$ , по-видимому, связано с тем, что при температурах, близких к температуре плавления, вынос вещества с поверхности мишени происходит не только в результате испарения, но и при вытеснении жидкой фазы из кратера давлением паров. Это приводит к изменению формы кратера, он окружен бруствером из микрокапель. Изменяется объем излучающей плазмы, ее светимость и область захвата регистрирующей аппаратуры. Лазерная абляция твердых тел, находящихся при температурах, близких к температуре плавления, требует отдельного рассмотрения.

### Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что температура поверхности мишени существенно влияет на абляционный вынос материала и интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы. Проведенная оценка температуры эрозионного кратера после действия первого лазерного импульса при межимпульсном интервале  $\sim 1$  мкс, в экспериментальных условиях, описанных выше, составляла  $600-700^\circ\text{C}$ .

### Библиографические ссылки

1. Кремерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. Москва: Техносфера; 2009. 370 с.
2. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Жукова И.И. Модификация химического состава и повышение износостойкости полужиритовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавящего корунда. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика* 2017; (2): 83-94.

3. Зажогин А.П., Фадаиян А.Р. Динамика процессов абляции и развития приповерхностной лазерной плазмы сплавов алюминия сдвоенными лазерными импульсами. *Вестник БГУ. Сер. 1. Физ. Матем. Информ.* 2008; (3): 15-18.
4. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. Chemical Composition of Ceramic Tile Glazes. *J. of Appl. Spectr.* 2016; 83(5): 764-770.
5. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэм. Фіз. Інфарм. Вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(3): 100-113.
6. Зноско К.Ф., Лещик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка* 2021; 11(1): 45-58.
7. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэм. Фіз. Інфарм. Вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(2): 103-115.
8. Зноско К.Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэм. Фіз. Інфарм., вылічальная тэхніка і кіраванне* 2021; 11(1): 94-106.
9. Леднев В.Н., Сдвиженский П.А., Асютин Р.Д., Гришин М.Я., Третьяков Р.С., Першин С.М. Влияние приповерхностной плазмы на лазерную абляцию наносекундными импульсами. *Кр. сообщ. по физике ФИАН* 2018; (12): 66-73.
10. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И., Зноско К.Ф., Бельков М.В. Исследование химического состава глазурей керамических плиток. *Журн. прикл. спектр.* 2016; 83(5): 724-730.
3. Zazhogin A.P., Fadayan A.R. Dinamika protsessov ablyatsii i razvitiia pripoverkhnostnoi lazernoi plazmy splavov aliuminiia sdvoennymi lazernymi impul'sami [Dynamics of ablation and development of a surface laser plasma of aluminum alloys by double laser pulses]. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fiz. Matem. Inform.* 2008; (3): 15-18. (In Russian).
4. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. Chemical Composition of Ceramic Tile Glazes. *Journal of Applied Spectroscopy* 2016; 83(5): 764-770.
5. Znosko K.F. Rost effektivnosti vzaimodey-stviya sdvoennykh impul'sov YAG:Nd<sup>3+</sup>-lazera s Al mishen'yu pri umen'shenii mezhimpul'snogo inter-vala. [Increasing the efficiency of interaction of double pulses of YAG:Nd<sup>3+</sup>-laser with Al target when the pulse interval decreases]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matem. Fiz. Infarm, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2020; 10(3): 100-113. (In Russian).
6. Znosko K.F., Leshchik S.D. Optimizatsiya dvukhimpul'snogo rezhima lazernoy ablyatsii tsvetnykh metallov. [Optimization of the two-pulse mode of laser ablation of non-ferrous metals]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 6. Tekhnika* 2021; 11(1): 45-58. (In Russian).
7. Znosko K.F. Usilenie intensivnosti spektral'nykh liniy lazerno-emissionnoi plazmy pri ee formirovaniy sdvoennymi lazernymi impul'sami. [Increasing the intensity of spectral lines of laser-emission plasma when it is formed by double laser pulses]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matem. Fiz. Infarm., vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2020; 10(2): 103-115. (In Russian).
8. Znosko K.F. Vliyanie temperatury misheni na intensivnost' spektral'nykh liniy lazerno-emissionnoy plazmy. [Effect of target temperature on the intensity of spectral lines of laser-emission plasma]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2021; 11(1): 94-106. (In Russian).
9. Lednev V.N., Sdvizhenskiy P.A., Asyutin R.D., Grishin M.Ya., Tret'yakov R.S., Pershin S.M. Vliyanie pripoverkhnostnoy plazmy na lazer-nuyu ablyatsiyu nanosekundnymi impul'sami. [Influence of near-surface plasma on laser ablation by nanosecond pulses]. *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* 2018; (12): 66-73. (In Russian).
10. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. Issledovanie khimicheskogo sostava glazurei keramicheskikh plitok. [The study of the chemical composition of glazes of ceramic tiles]. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* 2016; 83(5): 724-730. (In Russian).

## References

1. Kremers D., Radiemski L. Lazerno-iskrovaia emissionnaia spektroskopiiia [Laser-Induced Breakdown Spectroscopy]. Moscow: Tekhnosfera; 2009. 370 p. (In Russian).
2. Anufrik S.S., Kurian N.N., Znosko K.F., Zhukova I.I. Modifikatsiia khimicheskogo sostava i povyshenie iznosostoikosti polufrittovoi glazuri napol'noi keramicheskoi plitki putem dobavleniia pravlennogo korunda. [Modification of the chemical composition and increase of wear resistance of semifrit glazed ceramic floor tiles by adding corrected corundum]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika* 2017; (2): 83-94. (In Russian).