

УДК 621.373.826

*Саубанов Р.Р., аспирант, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

*Звездин В.В., д.т.н., профессор, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

*Звездина Н.М., ст.преподаватель, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

*Рахимов Р.Р., аспирант, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

*Загиров Р.Г., соискатель, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ МЕТАЛЛОВ

*Аннотация: Рассматриваются оптико-электронный метод исследования зоны взаимодействия лазерного излучения с металлами. Предложен метод измерения интенсивности собственного теплового излучения из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом для повышения эффективности технологического процесса лазерной закалки металлов.*

*Ключевые слова: лазерная закалка, лазерная излучения, фотоприемник.*

### **Введение.**

Для построения систем управления лазер ЛТК (лазерный технологический комплекс) необходимо измерять энергетические и пространственные характеристики ЛИ (лазерного излучения). Для этого применяют оптико-электронные методы зоны взаимодействия ЛИ с металлом [1,2].

Известно, что основной вклад в шумы электронного тракта фотоэлектрических систем, использующих в качестве фотоприёмников фотодиоды, вносит, собственно, фотоприёмник, причём основной вклад дают дробовые  $G_0$  и шумы типа  $\frac{G_0}{|\omega|^n}$ . На Рис. 1. приведена типичная для фотодиодов зависимость спектра дисперсий шумов фотодиодов от частоты.

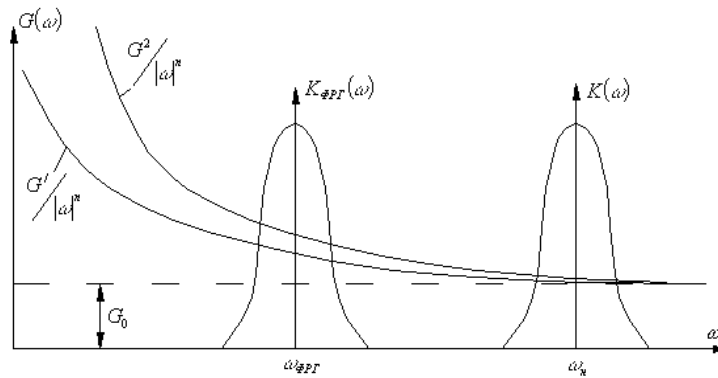


Рис. 1. Зависимость спектра дисперсий шумов фотодиодов от частоты

Запишем выражение для спектра дисперсий каждого из каналов собственных шумов двухканального фотоэлектрического датчика угла:

$$G_2^I = G_0^1 + \frac{G_0^1}{|\omega|^n},$$

$$G_2^{II} = 1,1 \cdot \left( G_0^1 + \frac{G_0^1}{|\omega|^n} \right).$$

Поскольку выходной сигнал мы получаем на выходе схемы вычитания, то собственные шумы на выходе датчика угла будут иметь вид:

$$G_2 = 2,1 \cdot \left( G_0 + \frac{G_0^1}{|\omega|^n} \right)$$

где  $\omega$  - текущая частота

$$G_0 = 2 \cdot e \cdot \Phi \cdot \gamma \cdot \Delta f$$

где  $e$  - заряд электрона, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,

$\Phi$  - эффективный поток, воспринимаемый фотоприёмником ( $Bm$ ).

$\gamma$  - вольт - ватная характеристика фотоприёмника  $\left( \frac{B}{Bm} \right)$

$\Delta f$  - полоса обработки электронного тракта фотоэлектрического датчика угла.

Выражение для спектра дисперсий одноканального фотоэлектрического датчика угла будет иметь вид с учётом использования несущей частоты  $\omega_n$ .

$$G_I = G_0 = 2 \cdot e \cdot \Phi \cdot \gamma \cdot \Delta f$$

Пренебрегая для простоты вторым членом в выражении для спектра мощности двухканального фотоэлектрического датчика угла и взяв отношение  $G_1/G_{2\Sigma}$  получим, что собственные шумы фотоэлектрического одноканального датчика угла в два раза меньше шумов двухканального датчика угла, а значит угловая пороговая чувствительность одноканального датчика угла в 1,4 раза выше чем двухканального.

Считая, что статическая характеристика фотоэлектрического датчика угла имеет вид  $tg\Theta = \frac{\partial U_{вых}}{\partial \alpha}$ . Для двухканального фотоэлектрического датчика угла будет иметь вид Рис. 2а и для одноканального фотоэлектрического датчика угла на Рис. 2б.

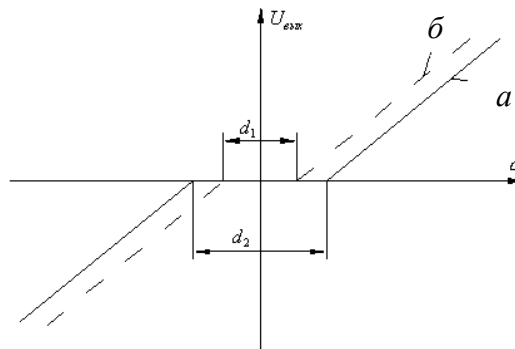


Рис. 2. Статическая характеристика фотоэлектрического датчика угла

а) двухканального; б) одноканального.

Из рисунка 2а и 2б видно, что зона нечувствительности одноканального фотоэлектрического датчика угла в два раза меньше.

Для всех видов этих МФП (матричный фотоприемник) вольтовая чувствительность  $S_V$  определяется формулой [3]:

$$S_V = \frac{\alpha_n Y_n}{\Lambda [1 + (2\pi f_m t_T)^2]^{1/2}}; \quad t_T = C_T / \Lambda, \quad (1)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент поглощения излучения материалом элемента МФП;  
 $Y_n = \Delta U / \Delta T$  – коэффициент преобразования приращения температуры элемента в изменение напряжения на его выходе, В/К;

$C_T$  – теплоемкость элемента, Дж/К;

$\Lambda$  – тепловая проводимость элемента, Вт/К;

$t_T$  – тепловая постоянная времени, с;

$f_M$  – частота модуляции излучения, Гц (при отсутствии модуляции  $f_M = 0$ );

Фотонный шум тепловых МФП определяет соответствующее значение удельной обнаружительной способности [3,4]:

$$D_{\text{фот}}^* = \frac{\sqrt{\alpha_n}}{\sqrt{16k\sigma T_n^5}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана.

Температурный шум тепловых МФП связан с флуктуациями процесса теплообмена элемента с окружающей средой. Ему отвечает значение [2,3]:

$$D_{\text{темп}}^* = \frac{\alpha_n \sqrt{S_n}}{\sqrt{4kT_n^2 \Lambda}}, \quad (3)$$

Тепловой шум микроболометрического и термоэлектрического элементов МФП дает величину [2,3]:

$$D_{\text{теп}}^* = \frac{S_V \sqrt{S_n}}{\sqrt{4kT_n R}}. \quad (4)$$

Для пироэлектрического МФП данная формула имеет несколько иной вид [3]:

$$D_{\text{теп}}^* = \frac{S_V \sqrt{S_n}}{\sqrt{4kT_n R^2 C / R_n C_n}}. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что относительная спектральная чувствительность теплового МФП  $S(\lambda) = 1$ , и, следовательно, коэффициент пересчета  $K_n = 1$ , для искомого значения  $\Delta E_0$ , получаем:

$$\Delta E_0 = \frac{\left[ \left( \frac{\sqrt{\Delta f_u}}{D_{\text{фот}}^*} \right)^2 + \left( \frac{\sqrt{\Delta f_u}}{D_{\text{темп}}^*} \right)^2 + \left( \frac{\sqrt{\Delta f_{yc}}}{D_{\text{мен}}^*} \right)^2 \right]^{1/2}}{\sqrt{S_n}}. \quad (6)$$

Для определенности при сравнении МФП здесь также можно считать  $\Delta f_{yc} = \Delta f$ . ФПМ интегрирования, определяемая, как и для обычного фотоприемника, размерами его чувствительного элемента [3,4]:

$$K_{\text{инт}}(x_o, y_o) = \frac{\sin(\pi x_o)}{\pi x_o} \cdot \frac{\sin(\pi y_o)}{\pi y_o}; \quad (7)$$

$$x_o = \nu \delta_o; y_o = \mu \delta_o; \delta_o = a/f,$$

где  $\nu, \mu$  - угловая частота по строке и кадру соответственно,  $\text{рад}^{-1}$ ;

$\delta_o$  – элементарное поле зрения, рад;

$a \times a$  – размеры элемента, см;

$f$  – фокусное расстояние объектива, см.

ФПМ переноса, связанная с неполным переносом накопленного заряда вдоль строк матрицы ПЗС, имеет вид [8]:

$$K_{\text{пер}}(x_o, y_o) = \exp[-n_{\text{пс}} \varepsilon_{\text{п}} (1 - \cos(\pi x_o/x_n))] \exp[-n_{\text{пк}} \varepsilon_{\text{п}} (1 - \cos(\pi y_o/y_n))], \quad (8)$$

$$x_n = \nu_n \delta_o = \alpha_c/2; y_n = \mu_n \delta_o = \alpha_k/2;$$

$$\nu_n = \alpha_c/2\delta_o; \mu_n = \alpha_k/2\delta_o; \alpha_c = \alpha \alpha_{\text{со}}; \alpha_k = \alpha \alpha_{\text{ко}};$$

$$\alpha_{\text{со}} = a/\Delta a_c; \alpha_{\text{ко}} = a/\Delta a_k,$$

где  $\varepsilon_{\text{п}}$  – неэффективность переноса заряда (обычно  $\varepsilon_{\text{п}} = (3-5)10^{-5}$ );

$n_{\text{пс}}, n_{\text{пк}}$  – число переносов заряда по строке и кадру;

$\nu_n, \mu_n$  – частота Найквиста по строке и кадру,  $\text{рад}^{-1}$ ;

$\Delta a_c \times \Delta a_k$  – шаг (период) структуры МФП по строке и кадру, см;

$\alpha_{\text{со}}, \alpha_{\text{ко}}$  – коэффициенты переналожения по строке и по кадру;

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий возможное смещение второго полукадра ТВП на полпериода структуры МФП относительно первого (для повышения углового разрешения); в этом случае вместо  $\alpha = 1$  имеем  $\alpha = 2$ , и эффективные значения  $\alpha_c, \alpha_k$  коэффициентов переналожения удваиваются.

Коэффициенты переналожения  $\alpha_{\text{со}}, \alpha_{\text{ко}}$  определяют коэффициент заполнения МФП:

$$K_{\text{зап}} = \alpha_{\text{со}} \alpha_{\text{ко}}.$$

Поскольку во избежание оптической связи между элементами МФП зазор между ними должен превышать рабочую длину волны излучения, то для типового размера элемента  $a = 0,03$  мм обычно значение  $K_{\text{зап}} \leq 0,8$ .

Для контроля лазерной закалки используем метод измерения интенсивности собственного теплового излучения из зоны взаимодействия ЛИ

с металлом (Рис. 3). Для этого используют МФП. Отрицательная обратная связь (ООС) в САУ (система автоматического управления) ЛТК позволяет стабилизировать требуемые показатели качества ТП. К ним относятся шероховатость, микротвердость, глубина упрочненной зоны [5,6].

Экспериментальные исследования лазерной закалки.

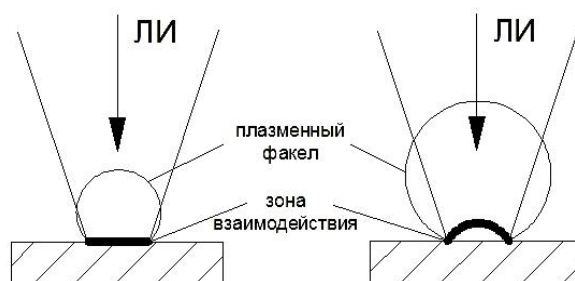


Рис. 3. Зоны термического влияния при различных технологических параметрах  
Поглощающее покрытие ЦМС-510

#### 1. Лазерная закалка с оплавлением

Микротвердость исходной структуры 232 HV<sub>50</sub>

Состояние упрочненной зоны

- I зона провара – 0,21 мм
- II зона термического влияния – 0,37 мм,
- общая глубина 0,58 мм

Микроструктура – мартенсит разной степени отпуска, феррит в виде грубой сетки.

Для сравнительного анализа были проведены исследования микроструктуры и микротвердости стали 45, обработанной лазерным излучением в среде азота под флюсом и с наплавлением слоя порошка ПГ-СР4-ОМ при одних и тех же режимах (Рис. 4). Значение микротвердости приповерхностных слоев мартенситного слоя стали 45, обработанной под флюсом составляет 1003 HV<sub>0,1</sub>, (Рис. 5 а, б) а при наплавке слоя порошка ПГ-СР4-ОМ равна 1097 HV<sub>0,1</sub>. Это объясняется выбором оптимальных значений параметров ТК, характеризующих распределение температурного поля в зоне термического влияния КПЭ за счет высокой плотности энергии [7].

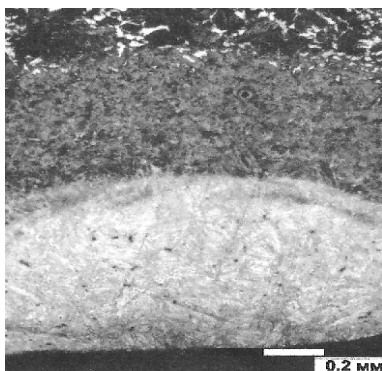


Рис. 4. Микроструктура наплавленного слоя порошка ПГ-СР4-ОМ на сталь 45 лазерным излучением в среде азота

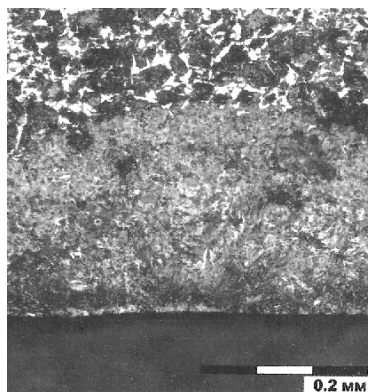


Рис. 5а. Микроструктура закаленной зоны под флюсом (АН – 43) стали 45 плазменным потоком в среде азота

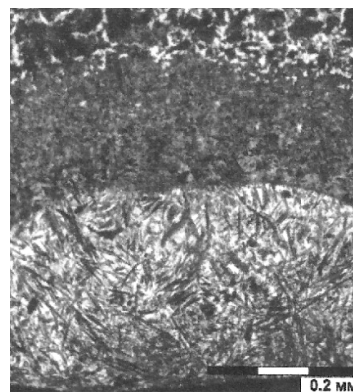


Рис. 5б. Микроструктура закаленной зоны под флюсом (АН – 43) стали 45 лазерным излучением в среде азота

## 2. Лазерная закалка без оплавления

Микротвердость исходной структуры 232 HV<sub>50</sub>

Состояние упрочненной зоны

- I зона провара – 0,075 мм
- II зона термического влияния – 0,3 мм
- общая глубина 0,375 мм

Микроструктура – мартенсит разной степени отпуска, феррит в виде грубой сетки (Рис. 6).

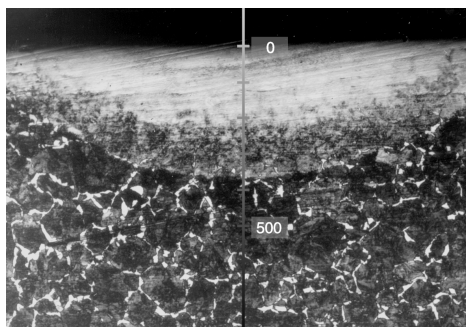


Рис. 6. Образец после воздействия лазерного излучения мощностью 0,7 кВт

### 3. Лазерная закалка без оплавления

Микротвердость исходной структуры 232 HV<sub>50</sub>

Состояние упрочненной зоны

- I зона провара – 0,045 мм

- II зона термического влияния – 0,225 мм

общая глубина 0,27 мм

Микроструктура – мартенсит разной степени отпуска, феррит в виде сетки (Рис. 7).

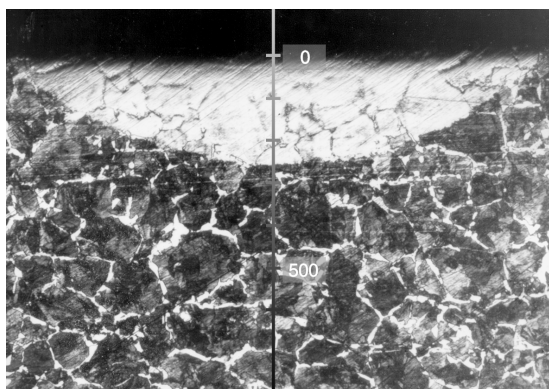


Рис. 7. Образец после воздействия лазерного излучения мощностью 0,5 кВт

#### **Заключение**

Результаты экспериментов показали, что качество обработки и ее стабильность зависят от параметров режима обработки, излучения, типа обрабатываемого материала и типа поглощающего покрытия.

Показателям качества выступают шероховатость упрочненной поверхности, глубина упрочненного слоя, микротвердость, однородность химического состава и микроструктуры.

Основные параметры ЛТК влияющие на показатели качества: плотность мощности (радиус лазерного пятна, мощность излучения).

Общим для всех способов закалки металлов является его нагрев до температуры закалки с последующим охлаждением. Поэтому в качестве оценки технологического процесса закалки часто выступает температура зоны, время выдержки для фазовых преобразований микроструктуры и скорость охлаждения.



## Литература

1. Звездин В. В., Хамадеев А. В., Каримов Р. Б. Модель формирования микроструктур в металлах при лазерной обработке // Межвузовский научный сборник «Проектирование и исследование технических систем» – Наб. Челны, 2007. - №11. - С. 150-154.
  2. Звездин В. В., Фардиев Р.К., Хамадеев А. В., Исрафилов Д.И., Башмаков Д.А. Влияние модового состава лазерного излучения на зону термического воздействия в металлах // Вестник КГТУ им. Туполева. - 2007. -№2 -С.84-85.
  3. Богомоллов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК систем. - М.: Радио и связь, 1987.
  4. Саубанов Р.Р., Рахимов Р.Р., Звездин В.В., Исрафилов И.Х. Способ наноструктурной модификаций поверхностного слоя деталей концентрированными потоками энергии // Материалы 13-й межд. научно-практ. конф. - Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2011. - №3. - С.389-394.
  5. Саубанов Р.Р., Алеев Р.М., Звездин В.В., Галиев Р.М. Рахимов Р.Р. Способ измерения информативного параметра на основе оптико-физических методов исследований // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. - №1. - С. 231-237.
  6. Портнов С.М., Саубанов Р.Р., Кисаев Р.А., Кузнецов И.Н., Исрафилов И.Х., Звездин В.В., Нугуманова А.И. Система управление процессом термообработки концентрированными потоками энергии поверхности деталей // Глобальный научный потенциал. - 2011. - №8. - С. 95-99.
  7. Саубанов Р.Р., Рахимов Р.Р., Звездин В.В. Влияние информативных параметров термообработки неметаллических многокомпонентных материалов на показатели качества // Наука и образование в современном обществе: «Вектор развития»: тезисы докл. Международная научно-практическая конференция, 2014. - С. 70-72.
-

*Saubanov Rusl.R., graduate student, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University*

*Zvezdin V.V., Doctor of Technical Sciences, professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University*

*Zvezdina NM, teacher, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University*

*Rakhimov R.R., graduate student, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University*

*Zagiriv RG, applicant, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University*

## OPTOELECTRONIC METHOD OF RESEARCH AREAS LASER HARDENING METALS

*Abstract: optoelectronic method zone of interaction of laser radiation with metals. A method for measuring the intensity of the thermal radiation from the zone of interaction of laser radiation with metal.*

*Key words: laser hardening, laser radiation photodetector.*