

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

© 2018

Д.А. Башмаков, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов
Набережночелнинский институт (филиал)

Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны (Россия)

Г.А. Туричин, доктор технических наук, исполняющий обязанности ректора

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова: лазерное излучение; лазерно-полевая обработка; упрочнение; электростатическое поле.

Аннотация: Современные методы лазерной обработки материалов активно внедряются в производство. Однако широкое их применение в машиностроении сдерживается высокой энергоемкостью процессов и неизученностью сложных быстропротекающих процессов таких технологий обработки. Статья посвящена гибридным лазерным технологиям обработки материалов, в частности лазерно-полевой закалке металлов. Проведено теоретическое исследование процесса лазерного взаимодействия с металлом; показано, что коэффициент отражения лазерного излучения и глубина его проникновения зависят от электропроводности скин-слоя. Выявлены основные взаимосвязи показателей качества обработанного слоя с параметрами лазерно-полевого технологического комплекса. Приведены результаты исследований по гибридной лазерно-полевой закалке в электростатическом поле широко используемых в машиностроении сталей (Сталь 10, Сталь 45, Сталь 65Г). Показано, что наложение электростатического поля на зону обработки приводит к увеличению глубины и твердости закаленного слоя за счет направленного движения электронов в глубь металла. Предложена математическая модель распределения температурного поля в металле под воздействием лазерного излучения, учитывающая наложение электростатического поля и позволяющая исследовать динамику технологического процесса закалки. Математически обосновано ограничение увеличения скорости охлаждения материала путем направленного движения электронов в электростатическом поле. Рассчитаны конкретные значения коэффициента влияния электростатического поля. Показано, что при наложении внешнего поля пороговое, критическое значение плотности мощности лазерного излучения, вызывающего оплавление обрабатываемой поверхности, увеличивается. Предложены конкретные математические модели для использования при подготовке производства для определения требуемой мощности лазерного излучения и напряженности электростатического поля. На основании полученных результатов предложена принципиальная технологическая схема, разработана и изготовлена установка лазерно-полевого технологического комплекса.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении возможности использования лазерного излучения (ЛИ), как универсального инструмента при обработке различных материалов, определяются законами протекания таких процессов и явлений, как поглощение ЛИ, поверхностный и объемный нагрев материала, плавление материала, его эрозия, образование зон термического влияния (ЗТВ) [1; 2], изменение напряженно-деформированного состояния, диффузия элементов в условиях тепловых воздействий и т. п. [3; 4]. Гибридные лазерные технологии в мировой практике в основном представлены лазерно-дуговой обработкой [5; 6], что связано с наличием большого количества экспериментальных данных и разработанными технологиями [7; 8]. Другие гибридные методы обработки: двухлучевая лазерная, лазерно-индукционная, лазерно-плазменная, лазерно-светолучевая – также находят применение в промышленности и достаточно хорошо исследованы [8]. Однако научные труды по лазерно-полевой обработке практически не представлены. Отсутствует полная теория совместного воздействия ЛИ и различных полей на обрабатываемый материал.

В мировой науке работы по совместному воздействию различных полей и ЛИ в основном сконцентрированы в Японии. Работы по лазерно-электростатической и лазерно-электромагнитной технологии в области механического давления ведутся в Tokai University в Японии [9; 10]. Стоит отметить и исследования по лазерно-

электростатической технологии модификации графена в Shahid Beheshti University, Иран [11].

Из проведенного краткого обзора понятно, что исследования по лазерно-полевой технологии в РФ практически отсутствуют. В этой связи для решения повышения производительности лазерной обработки и расширения области использования ЛИ необходимо дальнейшее развитие теории взаимодействия ЛИ с материалом, учитывающей влияние внешних возмущающих факторов, таких как электромагнитные, магнитные и электростатические поля.

Цель работы – изучение совместного воздействия ЛИ и электростатического поля на обрабатываемый металл, используемый в машиностроении, с выявлением особенностей ЗТВ и создание математической модели такого комбинированного влияния для дальнейшей разработки технологии лазерно-полевого воздействия.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Лазерное упрочнение рабочей поверхности металлического изделия при мощностях, близких к критическим, не допускающим оплавления, не дают стабильных и требуемых на производстве показателей качества поверхности [12]. Поэтому помимо параметров лазерно-полевого технологического комплекса (ЛПТК), играющих основную роль в достижении требуемого технологического процесса (ТП), рассматриваемых в виде совокупности взаимодействующих между собой звеньев

сложной системы и напрямую влияющих на физику процесса взаимодействия ЛИ с металлом, требуется учитывать и электропроводность металла, от которой напрямую зависит коэффициент поглощения.

Взаимосвязь коэффициента поглощения с проводимостью материалов, в частности металлов, показывает, что свободные электроны в кристаллической решетке металла увеличивают долю отраженного ЛИ. Глубина скин-слоя δ для ЛИ определяется по формуле

$$\delta = 2(2\mu_0\sigma\omega)^{-0,5},$$

где μ – магнитная проницаемость материала, при частотах оптического диапазона для металлов равна 1;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м;

σ – удельная электропроводность обрабатываемого материала;

ω – циклическая частота излучения.

Материалы отражают излучение поверхностью в зависимости от диэлектрической проницаемости среды, что видно в следующей зависимости:

$$R = \frac{Q_{отр}}{Q_{пад}} = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right|^2,$$

где $Q_{отр}$, $Q_{пад}$ – энергия ЛИ, отраженная от поверхности металла и попадающая на него соответственно;

ε – диэлектрическая проницаемость среды.

В металле электроны проводимости можно считать полностью свободными, тогда коэффициент отражения будет рассчитываться в соответствии с формулой

$$R = 1 - \sqrt{\frac{2\omega}{\pi\sigma}}.$$

Исследования, проведенные по лазерной термообработке металлов, в т. ч. и других авторов, отражают нестабильность показателей качества ТП. К таким показателям качества ТП относятся: глубина зоны лазерного воздействия, микротвердость, шероховатость обработанной поверхности, химический состав и однородность микроструктуры [1].

Анализ взаимосвязи параметров ЛПТК, процесса лазерной закалки и показателей качества обработанного изделия показал, что сам ЛПТК основное влияние оказывает на температуру в зоне гибридной обработки, а от нее, в свою очередь, зависят все показатели качества ТП (рис. 1).

Данные рассуждения приводят к логическому заключению: для увеличения глубины ЗТВ при неизменной мощности ЛИ необходимо уменьшить проводимость скин-слоя. Используя внешние воздействия на заряженные частицы в материале, в частности электростатическое поле, возможно перераспределить электроны в металлах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

На основании теоретических данных разработан экспериментальный ЛПТК (рис. 2).

Лазерно-полевая технологическая установка включает в себя такие элементы, как лазерный технологический комплекс на базе волоконного лазера ЛС-2; фокусирующая система Precitec; микропроцессорная система; управляемый источник электростатического поля, связанный с дополнительным электродом.

Электроны, под действием силы со стороны положительно заряженного электрода скапливаясь на поверхности металла со стороны, противоположной зоне лазерной закалки, снижают проводимость скин-слоя детали в требуемой ЗТВ, что приведет к увеличению глубины проникновения ЛИ и повышению коэффициента его поглощения.

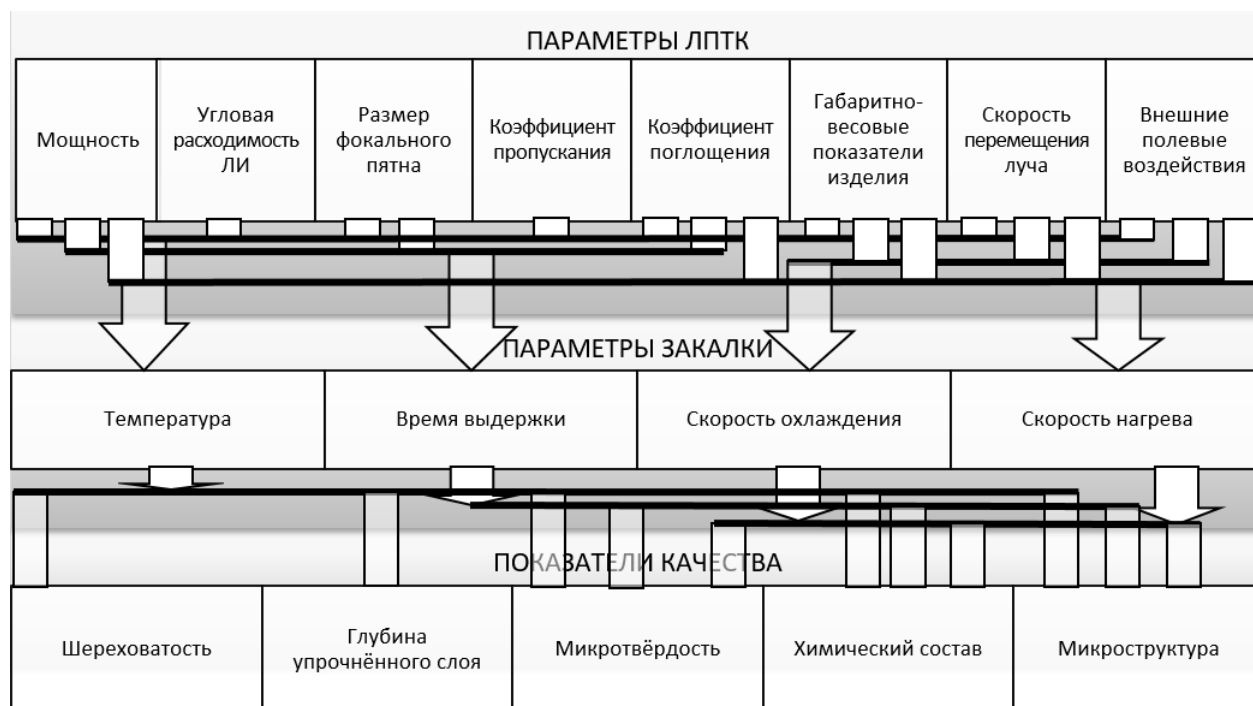


Рис. 1. Зависимость показателей качества обработанного слоя от параметров ЛПТК

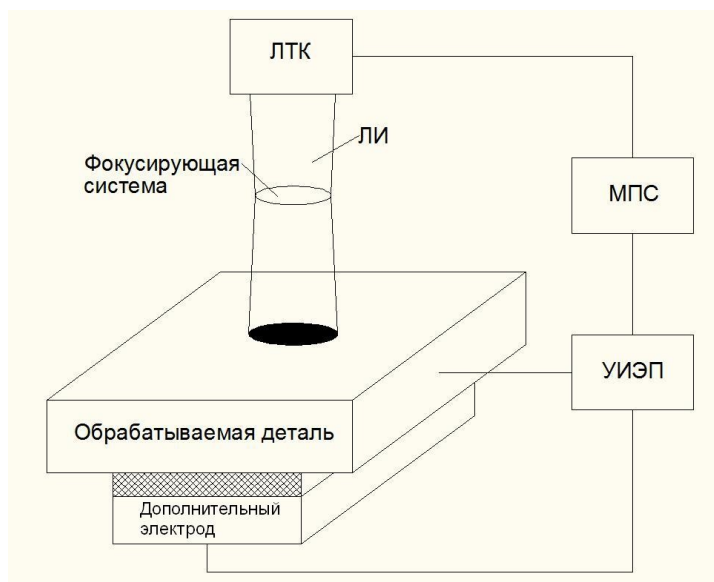


Рис. 2. Схема лазерно-полевой технологической установки

Для разработки ТП и отработки режимов лазерно-полевого воздействия необходимо контролировать основные параметры процесса и их влияние на показатели качества ТП (глубину упрочненного слоя, микроструктуру, химический состав, микротвердость, шероховатость поверхности и т. д.) [13; 14].

Плотность мощности ЛИ, время воздействия, точность позиционирования лазерного луча, напряженность электростатического поля и т. д. являются основными параметрами ЛПТК, оказывающими прямое влияние на показатели качества ТП. Микроструктурный анализ сталей, подвергшихся обработке концентрированными потоками энергии, в режимах, близких к критическим, без использования дополнительных внешних воздействий, показывает существенный рост микротвердости и глубины закаленной области материала, но при этом повышается вероятность недостижения требуемого качества поверхности в виде ее оплавления, что приводит к изменению геометрических параметров, а также к возможному увеличению шероховатости на 3–5 классов [15].

Путем регулирования мощности ЛИ, фокусного расстояния и напряженности электростатического поля устанавливаются необходимые для достижения требуемых показателей качества ТП параметры ЛПТК. Экспериментальная отработка ТП проводилась на образцах из стали 10, 45 и 65Г. Такой выбор материалов образцов обусловлен проведенным анализом использования марок сталей при производстве автомобиля КамАЗ [1].

Анализ зоны термической обработки ЛПТК (рис. 3) указывает на увеличение глубины упрочненной зоны для всех металлических образцов при неизменной мощности ЛИ, что актуально для деталей, работающих на истирание. На полученных графических зависимостях заметно нелинейное увеличение глубины ЗТВ от напряженности электростатического поля. При рассмотрении областей графика с напряженностью поля от 4 МВ/м и выше отмечено уменьшение интенсивности прироста глубины ЗТВ при аналогичном увеличении прикладываемого напряжения к дополнительному электроду для всех рассматриваемых материалов.

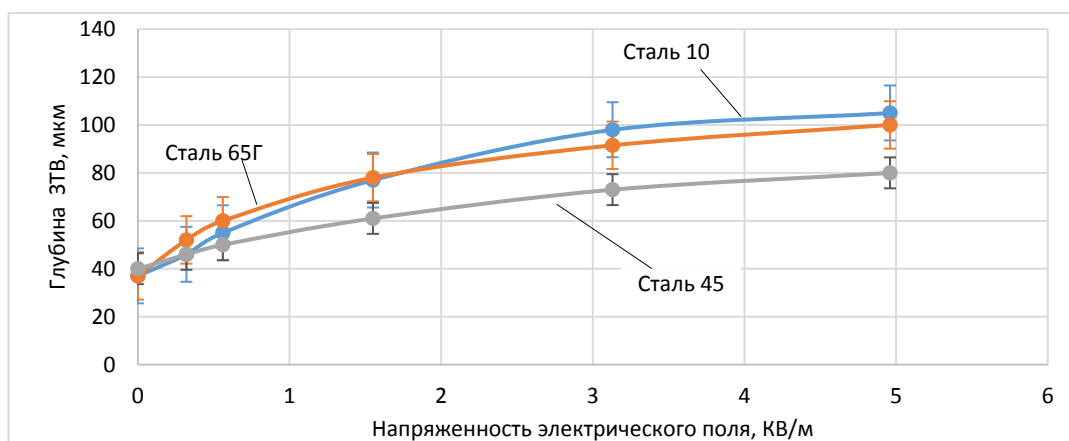


Рис. 3. Зависимость глубины упрочненной зоны от напряженности электростатического поля (1 – Сталь 10, $W=3$ КДж; 2 – Сталь 65Г, $W=4,5$ КДж; 3 – Сталь 45, $W=3,8$ КДж)

Дополнительным эффектом при обработке под воздействием внешнего поля является увеличение твердости упрочненного слоя от 100 HV_{0,05} для Стали 65Г и до 240 HV_{0,05} для Стали 10 (металлографические исследования проводились в лаборатории ОАО «КАМАЗ-Дизель», протокол исследования № 1322 от 22.03.2007). Средние значения полученных данных позволяют сделать вывод: чем тверже закаленный простым ЛИ металл, тем ниже прирост твердости при гибридной лазерно-полевой обработке. Данный эффект объясняется более интенсивным отводом тепловой энергии при охлаждении в глубь материала за счет направленного движения электронов; при этом стоит отметить, что присутствует критическая скорость движения электронов в материале под действием внешнего электростатического поля, которая и ограничивает интенсивность данного вида охлаждения. Закаливаемость Стали 10 объясняется изменением химического состава обработанного слоя при лазерном воздействии [16].

Экспериментальные исследования показывают, что показатели качества обработанных изделий и их стабильность зависят от параметров ТП и типа обрабатываемого материала [6; 8; 17]. Гибридная лазерная обработка с электростатическим полем прямой полярности приводит к повышению микротвердости и глубины ЗТВ одновременно с уменьшением вероятности оплавления обработанной зоны изделия, а при предельных значениях напряженности поля, равных 5 кВ/м, – к практически полному ее отсутствию [10; 11].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЗОНУ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

Расчет температурного поля в металле под воздействием ЛИ без наложения электростатического поля производился согласно математической модели [18]:

$$T = AP \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{4(\pi a(t-t'))^{3/2}} \times \frac{-((x+vt'-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2)}{4a(t-t')} dx' dy' dt' \quad (1)$$

где A – коэффициент поглощения ЛИ поверхностью;
 P – мощность ЛИ;

I – распределение интенсивности в пятне фокуса ЛИ;

a – температуропроводность, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$;

c – удельная теплоемкость;

ρ – плотность материала;

λ – теплопроводность.

На рис. 4 отражены расчеты по приведенной выше модели. По температурным кривым заметно, что в пределах $0 \pm 0,3$ мм отклонение температуры не превышает 30°C . Проведенные исследования однозначно показывают, что данные отклонения температурного поля на поверхности образца не могут оказать ощутимого воздействия на показатели качества ТП [19].

В отсутствии внешнего электрического поля электронный газ в проводнике, в частности в металле, покоится по отношению к положительным ионам решетки, так как все направления движения электронов равновероятны [20]. Средняя плотность тока будет равна нулю, как и средняя скорость электронов относительно решетки [13]. Под воздействием электростатического поля свободные электроны приобретают дополнительную к основной скорости u , направленную вдоль вектора напряженности электрического поля. Увеличение скорости движения u может происходить лишь во время свободного полета электрона между двумя последовательными столкновениями его с ионами решетки [13]. Непосредственно перед столкновением скорость электрона равна

$$u = \frac{eE}{m} \tau,$$

где e – заряд электрона;

E – напряженность электростатического поля;

m – масса электрона;

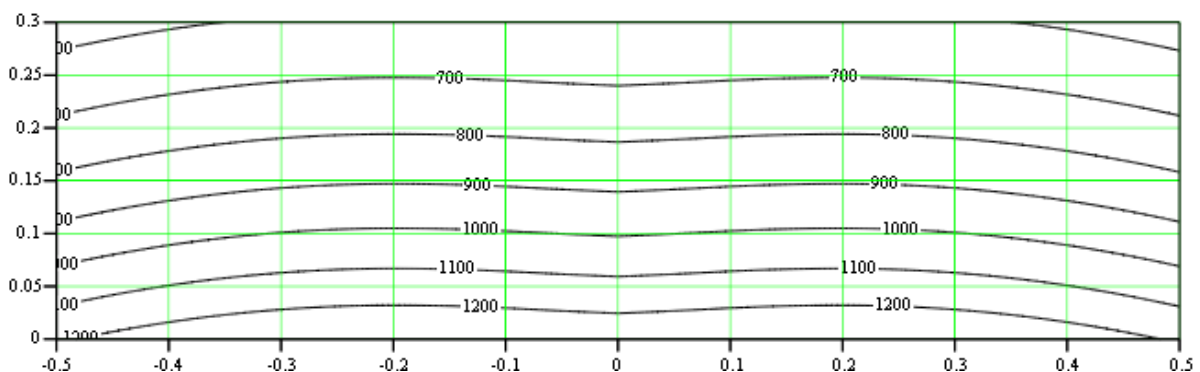
τ – время между столкновениями электрона, рассчитываемое по формуле $\tau = \frac{l}{v}$;

l – средняя длина пробега электрона;

v – средняя скорость беспорядочного движения электронов в отсутствии электростатического поля.

Среднее значение u можно будет рассчитать:

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau.$$



Т

Рис. 4. Температурные кривые расчетного воздействия ЛИ (TEM₁₀)

Данные рассуждения позволяют получить плотность электрического тока в проводнике под действием электростатического поля:

$$j = \frac{e^2 n l}{2 m v} E,$$

где n – количество электронов, находящихся в единице объема металла [1].

Ограниченность количества свободных электронов, электронов проводимости,двигающихся к необрабатываемой кромке детали для компенсации напряженности электрического поля, подтверждается экспериментальными данными [1]. Таким образом, во взаимодействии с электростатическим и другими электрическими полями принимает участие ограниченно-небольшая часть Δn электронов, которые расположены в узком ($\Delta E \ll E_F$) энергетическом слое ΔE , ограниченном поверхностью Ферми, поскольку только для них существуют возможные свободные энергетические состояния с большей энергией [21].

Электроны, расположенные ниже уровня Ферми на расстояниях больше ΔE , в отдельности не могут взаимодействовать с внешним электростатическим полем, так как все энергетические уровни, в которые они могли бы перейти после взаимодействия, заполнены другими электронами. Однако стоит учитывать вероятность одновременного изменения энергии электронами на одну и ту же величину. Распределение электронов проводимости в элементарном объеме проводника (стали) под воздействием электростатического поля можно рассчитывать по формуле

$$dn_s(E) = 2 \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3} = \frac{\sqrt{2}m_0^{\frac{3}{2}}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E} dE.$$

Стоит уточнить, что число электронных состояний $dn_s(E)$ с заданными значениями энергий в интервале от E до $(E+dE)$ равно удвоенному числу элементарных квантовых ячеек в р-пространстве в сферическом слое радиуса $p = (2mE)^{\frac{1}{2}}$ и толщины $dp = d(2mE)^{\frac{1}{2}}$. Данная система при определенных условиях под воздействием внешнего поля может смещаться как единое целое [14].

Преобразуем исходную математическую модель распространения температурного поля (1) в следующей форме:

$$T = P \sqrt{\frac{2\omega}{\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{4(\pi a(t-t'))^{3/2}} \times \\ \times e^{-\left(\frac{(x+vt'-x')^2 + (y-y')^2}{4a(t-t')} + \frac{(z-z')^2}{4a(t-t')}\right)} dx' dy' dt'$$

Далее, глубину ЗТВ, если ЛИ воздействует в точке $x'=0$, $y'=0$ и $z'=0$ и если считать начальным моментом времени момент начала взаимодействия ЛИ с металлом, возможно записать:

$$h_{zak}^2(x, y, t) = 4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega}} \times \\ \times \frac{T_{zak}(\pi at)^{3/2}}{\pi I} - (x^2 + y^2)$$

Для учета изменения глубины закалики при помощи гибридного лазерно-полевого воздействия введем коэффициент влияния электростатического поля (K_E):

$$h_{zak}(x, y, t) = K_E \sqrt{4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega}}} \times \\ \times \sqrt[4]{\frac{T_{zak}(\pi at)^{3/2}}{\pi I} - (x^2 + y^2)}$$

Обратные преобразования позволяют дополнить и уточнить исходную модель распределения температурного поля в металле для требований лазерно-полевой технологии:

$$T = P \sqrt{\frac{2\omega}{\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{4(\pi a(t-t'))^{3/2}} \times \\ \times e^{-\left(\frac{(x+vt'-x')^2 + (y-y')^2}{4a(t-t')} + \frac{(z-z')^2}{4K_E^2 a(t-t')}\right)} dx' dy' dt'$$

На основе полученных экспериментальных данных [1] (таблица 1) составим зависимости K_E для выбранных нами марок сталей. Если взять за основу результаты экспериментальных данных, возможно вычислить и значение коэффициента K_E в опорных точках (таблица 2).

Чаще всего при решении задач на производстве возникает необходимость вычисления максимальной глубины закаленного слоя, т. е. непосредственно под пятном воздействия ЛИ:

Таблица 1. Взаимосвязь глубины закаленного слоя и напряженности электростатического поля

Напряженность электростатического поля, МВ/м	Глубина зоны закалики для Стали 10, W=3 КДж, мм	Глубина зоны закалики для Стали 65Г, W=4,5 КДж, мм	Глубина зоны закалики для Стали 45, W=3,8 КДж, мм
4,69	0,110	0,1000	0,080
3,13	0,100	0,0915	0,073
1,55	0,080	0,0780	0,061
0,56	0,057	0,0600	0,050
0,32	0,050	0,0520	0,046
0,00	0,040	0,0370	0,040

Таблица 2. Значения K_E для отдельных марок сталей

Напряженность электростатического поля, МВ/м	K_E , Сталь 10, $W=3$ КДж	K_E , Сталь 65Г, $W=4,5$ КДж	K_E , Сталь 45, $W=3,8$ КДж
4,69	2,750	2,7027	2,000
3,13	2,500	2,4730	1,825
1,55	2,000	2,1081	1,525
0,56	1,425	1,6216	1,250
0,32	1,250	1,4054	1,150
0,00	1,000	1,0000	1,000

$$h_{zak}^2(t, E) = K_E^2 4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{zak}(\pi at)^{3/2}}{PI}},$$

$$\sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{zak}(\pi at)^{3/2}}{PI}} = e^{\frac{h_{zak}^2}{K_E^2 4at}}.$$

При расчете требуемой мощности ЛИ для достижения заданной глубины ЗТВ в ЛПТК возможно использовать следующую модель:

$$P(t, E, h_{zak}) = \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{zak}(\pi at)^{3/2}}{I}} e^{-\frac{h_{zak}^2}{K_E^2 4at}}.$$

В случае же жестко заданной мощности ЛИ напряженность электростатического поля легко определяется при помощи известных коэффициентов K_E , а далее по зависимостям для различных металлов [1]:

$$K_E = h_{zak} \left(4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{zak}(\pi at)^{3/2}}{PI}} - (x^2 + y^2) \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Исследуя динамику температурного поля в металле по времени на основе полученной математической модели, возможно определить скорости нагрева и охлаждения, предельные возникающие температуры. Систематизируя узлы управляющей системы ЛПТК по родственным признакам (достижение требуемой температуры, время нахождения объема в требуемом диапазоне температур и т. д.), возможно на стадии подготовки к производству определить не только глубину ЗТВ, но и форму, и размеры различных структурных зон, возникающих при лазерно-полевой обработке металлов. Результаты решения моделей могут быть представлены в виде изотермических поверхностей распределений температур в пространстве и во времени, очертаний различных структурных зон, возникающих при лазерно-полевой обработке.

Анализ зоны лазерно-полевой закалки показал, что наложение электростатического поля прямой полярности приводит к увеличению такого параметра, как глубина закаленного слоя, при всех режимах обработки металлов, одновременно и с увеличением твердости. Ширина закаленного при помощи лазерно-полевой технологии слоя металла остается неизменной при всех режимах обработки. Разработанная технологическая

схема реализации технологии лазерно-полевой обработки и созданная математическая модель закалки поверхности металлов позволяет исследовать динамику процесса упрочнения и повысить ее эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башмаков Д.А. Управление процессом лазерного термоупрочнения металлов в электрическом поле: дис. ... канд. тех. наук. Набережные Челны, 2010. 151 с.
2. Kuznetsov I.N., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Portnov S.M. Automatic control system of high precision welding of workpieces in mechanical engineering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 69. № 1. P. 012029.
3. Шлякова Е.В., Мозговой И.В., Соловьев А.А. Исследование влияния лазерного облучения на стойкость к электрохимической коррозии материала гильз цилиндров двигателя внутреннего сгорания // Омский научный вестник. 2008. № 2 (68). С. 22–25.
4. Песошин В.А., Звездин В.В., Портнов С.М., Кисаев Р.А., Кузнецов И.Н. Исследование процесса влияния изменения мощности при газолазерной резке металлов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2010. № 2. С. 43–46.
5. Турчин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Ахметов А.Д., Величко О.В. Лазерно-дуговая сварка в различных пространственных положениях // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2013. № 183-1. С. 218–225.
6. Турчин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В. Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2010. № 110. С. 181–187.
7. Турчин Г.А., Цибульский И.А., Валдайцева Е.А., Карасев М.В. Теория и технология гибридной сварки металлов больших толщин // Лучевые технологии и применение лазеров: 6-я междунар. конф. СПб., 2009. С. 11–18.
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Чирков А.М. Гибридные технологии лазерной сварки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 52 с.
9. O'Brian A.S., Gupta S.B., Vasu S.S. Review: laser ignition for aerospace propulsion // Propulsion and Power Research. 2016. Vol. 5. № 1. P. 1–21.
10. Akashi N., Oigawa Y., Hosokawa H., Horisawa H. Plasma Acceleration Characteristic of a Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Thruster // 50th AIAA/

- ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2014. Cleveland, 2014. P. 1585–1594.
11. Yadi M., Karimzadeh R., Abbasi A. Effect of treatment by electrostatic field and 532-nm laser irradiation on optical and thermo-optical properties of graphene oxide colloids // *Journal of Materials Science*. 2017. Vol. 52. № 8. P. 4532–4542.
 12. Khisamutdinov R.M., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Saubanov R.R., Rakhimov R.R., Spirin A.A. Study of processes of steels surfaces modification with highly concentrated energy flows // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 669. № 1. P. 012024.
 13. Паркин А.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии. Самара: СГТУ, 2004. 494 с.
 14. Звездин В.В., Башмаков Д.А. Повышение энергоэффективности при лазерной закалке // *Энергоресурсоэффективность и энергосбережение: труды IX Междунар. симпозиума. Казань, 2008. С. 369–371.*
 15. Заморский В.В. Повышение качества системы управления лазерным технологическим комплексом сварки ответственных деталей: дис. ... канд. тех. наук. Набережные Челны, 2003. 126 с.
 16. Башмаков Д.А., Ибрафиллов И.Х., Ибрафиллов Д.И. Исследование влияния лазерной обработки на химический состав металлов // *Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XXI междунар. науч.-тех. конф. Донецк: МСМ, 2014. С. 107–108.*
 17. Валиахметов Р.Р. Совершенствование системы управления лазерного технологического комплекса по критериям качества: дис. ... канд. тех. наук. Набережные Челны, 2004. 152 с.
 18. Башмаков Д.А. Модель расчета параметров лазерного термоупрочнения, учитывающая влияние электростатического поля // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2010. № 2. С. 10–14.
 19. Звездин В.В., Каримов Р.Б., Хамадеев А.В. Модель формирования микроструктур в металлах при лазерной обработке // *Проектирование и исследование технических систем: межвуз. науч. сб. Набережные Челны, 2007. С. 150–154.*
 20. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит, 2003. 615 с.
 21. Миронова Г.А. Зонная структура электронного энергетического спектра в твердых телах. Модели свободных и сильно связанных электронов. М.: Физический факультет МГУ, 2001.
URL: nature.web.ru/db/msg.html?mid=1174320&uri=page14.html.
 22. Shlyakova E.V., Mozgovoi I.V., Solovyov A.A. Analysis of laser exposure impact on resistance to electrochemical corrosion of material of cylinder sleeves of internal-combustion engine. *Omskiy nauchniy vestnik*, 2008, no. 2 (68), pp. 22–25.
 23. Pesoshin V.A., Zvezdin V.V., Portnov S.M., Kisaev R.A., Kuznetsov I.N. Investigation of the process of the influence of power variation in gas-laser cutting of metals. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2010, no. 2, pp. 43–46.
 24. Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Akhmetov A.D., Velichko O.V. Laser-arc welding in different attitude position. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2013, no. 183-1, pp. 218–225.
 25. Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V. Hybrid laser-arc welding of metals of large thickness. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2010, no. 110, pp. 181–187.
 26. Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Valdaytseva E.A., Karasev M.V. Theory and technology of hybrid welding of large metals. *6-ya mezhdunarodnaya konferentsiya "Luchevye tekhnologii i primeneniye lazerov"*. Sankt Petersburg, 2009, pp. 11–18.
 27. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Chirkov A.M. *Gibridnye tekhnologii lazernoy svarki* [Hybrid technologies for laser welding]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2004. 52 p.
 28. O'Brian A.S., Gupta S.B., Vasu S.S. Review: laser ignition for aerospace propulsion. *Propulsion and Power Research*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 1–21.
 29. Akashi N., Oigawa Y., Hosokawa H., Horisawa H. Plasma Acceleration Characteristic of a Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Thruster. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2014*. Cleveland, 2014, pp. 1585–1594.
 30. Yadi M., Karimzadeh R., Abbasi A. Effect of treatment by electrostatic field and 532-nm laser irradiation on optical and thermo-optical properties of graphene oxide colloids. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, no. 8, pp. 4532–4542.
 31. Khisamutdinov R.M., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Saubanov R.R., Rakhimov R.R., Spirin A.A. Study of processes of steels surfaces modification with highly concentrated energy flows. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 669, no. 1, p. 012024.
 32. Parkin A.A. *Tekhnologiya obrabotki kontsentrirovyemykh potokami energii* [Technology of processing by concentrated flows of energy]. Samara, SGTU Publ., 2004. 494 p.
 33. Zvezdin V.V., Bashmakov D.A. Energy efficiency enhancement in laser hardening. *Trudy IX Mezhdunar. simpoziuma "Energoeffektivnost' i energosberezhenie"*. Kazan', 2008, pp. 369–371.
 34. Zamorskiy V.V. *Povysheniye kachestva sistemy upravleniya lazernym tekhnologicheskim kompleksom svarki otvetstvennykh detaley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the quality of the control system for the laser technological complex for welding critical parts]. Naberezhnye Chelny, 2003. 126 p.
 35. Bashmakov D.A., Israfilov I.Kh., Israfilov D.I. Investigation of the effect of laser treatment on the chemical

REFERENCES

1. Bashmakov D.A. *Upravleniye protsessom lazernogo termouprochneniya metallov v elektricheskom pole*. Diss. kand. tekhn. nauk [Controlling the process of laser thermal hardening of metals in an electric field]. Naberezhnye Chelny, 2010. 151 p.
2. Kuznetsov I.N., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Portnov S.M. Automatic control system of high precision welding of workpieces in mechanical engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 69, no. 1, p. 012029.

- composition of metals. *Sbornik trudov XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Mashinostroyeniye i tekhnosfera XXI veka"*. Donetsk, MSM Publ., 2014, pp. 107–108.
17. Valiakhmetov R.R. *Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya lazernogo tekhnologicheskogo kompleksa po kriteriyam kachestva*. Diss. kand. tekhn. nauk [Perfection of a control system of a laser technological complex by quality criteria]. Naberezhnye Chelny, 2004. 152 p.
 18. Bashmakov D.A. Model for calculating the parameters of laser thermal hardening, taking into account the influence of the electrostatic field. *Sotsialno-ekonomicheskkiye i tekhnicheskkiye sistemy: issledovaniye, proektirovaniye, optimizatsiya*, 2010, no. 2, pp. 10–14.
 19. Zvezdin V.V., Karimov R.B., Khamadeev A.V. Model of formation of microstructures in metals during laser processing. *Mezhvuzovskiy nauchniy sbornik "Proektirovaniye i issledovaniye tekhnicheskikh sistem"*. Naberezhnye Chelny, 2007, pp. 150–154.
 20. Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 615 p.
 21. Mironova G.A. *Zonnaya struktura elektronnoy energeticheskoy spektra v tverdykh telakh. Modeli svobodnykh i silno svyazannykh elektronov* [Zone structure of the electron energy spectrum in solids. Models of free and strongly coupled electrons]. Moscow, Fizicheskii fakultet MGU Publ., 2001. URL: nature.web.ru/db/msg.html?mid=1174320&uri=page14.html.

THE INFLUENCE OF THE ELECTROSTATIC FIELD ON THE LASER THERMO-PROCESSING OF METALS

© 2018

D.A. Bashmakov, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair of High-Energy Processes and Aggregates

Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny (Russia)

G.A. Turichin, Doctor of Sciences (Engineering), Acting Rector
Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg (Russia)

Keywords: laser radiation; laser-field processing; hardening; electrostatic field.

Abstract: Modern methods of laser processing of the materials are actively introduced into production. However, their wide application in engineering is hampered by the high energy intensity of the processes and the unexplored complex high-speed processes of such processing technologies. This paper covers the hybrid laser technologies for processing materials, in particular, laser-field hardening of metals. The theoretical study of laser interaction with metal is carried out; it is shown that the laser radiation reflection index and the depth of its penetration depend on the electrical conductivity of a skin layer. The study determined the main interrelations between the quality parameters of a treated layer and the parameters of the laser-field technological complex. The paper gives the results of the study on hybrid laser-field hardening of steels widely used in engineering (Steel 10, Steel 45, and Steel 65G) in the electrostatic field. It is shown, that the electrostatic field superposition on a treatment zone leads to the increase in the depth and hardness of a hardened layer through the directed motion of electrons deep into metals. The authors offer a mathematical model for the temperature field distribution in metal under the influence of laser radiation that considers the electrostatic field superposition and allows investigating the dynamics of the hybrid laser hardening. The limitation of the increase in the rate of material cooling by the electrons directional motion in the electrostatic field is mathematically substantiated. The specific values of the electrostatic field influence coefficient are calculated. It is shown, that when superposing the external field, the threshold, critical value of the density of the laser radiation power causing the melting of the treated surface increases. The authors offer the specific mathematical models to be used when preparing a production for determining the required laser radiation power and the strength of the electrostatic field. Based on the results of the study, the principal process scheme is offered, and the laser-field technological complex facility is designed and manufactured.