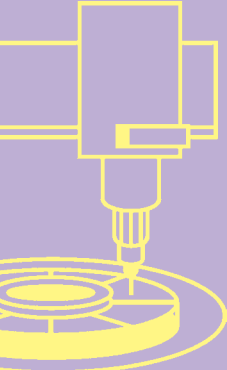


# ОБЪЕМНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ В ПЛАЗМЕННОМ ФАКЕЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАТЕРИАЛЫ



**К**ластеры конденсированной фазы образуются в результате расширения и охлаждения паров металла в плазменном факеле. Они понижают среднюю энергию электронов в плазме и влияют на протекание кинетических процессов. Статья посвящена исследованиям этого эффекта и заинтересует разработчиков технологий синтеза нанопорошков и получения тонких пленок и покрытий.

Фундаментальные исследования процессов формирования плазмы при воздействии высококонцентрированных потоков энергии на металлические материалы проводятся в Институте сварочных и лазерных технологий СПбГПУ более 10 лет. В результате созданы: кинетическая теория оптического лазерно-индуцированного разряда в парах металла, позволяющая описать влияние плазмы парогазового канала на протекание процессов лазерной сварки [1]; самосогласованная модель кинетики плазмы гибридного разряда с учетом взаимного влияния лазерного излучения и электрической дуги [2]; газодинамическая модель формирования химического состава плазменного факела при смешении паров металла с защитным газом [3]; самосогласованное аналитическое описание формирования плазменного факела при лазерно-дуговом воздействии, основанное на совместном решении задач газодинамики и плазменной кинетики без предположения о термодинамическом равновесии, с учетом объемного тепловыделения, диффузии, вязкости и сжимаемости парогазовой смеси [4].

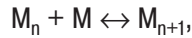
Поглощая фотоны за счет эффекта обратного торможения, свободные электроны набирают энергию в лазерном поле, что приводит к частичной ионизации паров металла и развитию оптического (в случае лазерного воздействия) или лазерно-дугового (при гибридном воздействии) разряда. Плазменный факел над поверхностью обрабатываемого металла

оказывает значительное влияние на ход как лазерных, так и гибридных лазерно-дуговых технологических процессов обработки, таких как сварка, наплавка и напыление. Разработанная самосогласованная модель кинетики гибридного разряда и газовой динамики плазменного факела при лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением [4] дает возможность определить основные характеристики плазменного факела и его влияния на распределение теплового источника на поверхности изделия. Полученные результаты предсказывают формирование узкого проводящего канала у поверхности образца и позволяют объяснить и количественно описать повышение концентрации энергетического вклада дуги. Это подтвердилось экспериментальными наблюдениями при гибридном лазерно-дуговом воздействии на материалы.

При мощном лазерном или лазерно-дуговом воздействии на металлические мишени поток испарившихся атомов смешивается с окружающим (защитным) газом, и последующее расширение этой смеси ведет к снижению ее температуры и пересыщению. В результате становится возможным образование и рост кластеров конденсированной фазы. Наличие конденсированной фазы в плазменном факеле может оказывать значительное влияние на кинетические процессы, протекающие в плазме, и, как следствие, на макроскопические характеристики самой плазмы. Причиной такого влияния является электронный обмен между плазмой и конденсатом.

## РОСТ КЛАСТЕРОВ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ В ПЛАЗМЕННОМ ФАКЕЛЕ

Эволюцию кластеров в пароплазменной фазе можно описать с помощью следующей схемы:



где  $M$  – атом металла,  $M_n$  – кластер, состоящий из  $n$  атомов.

Изменение числа атомов в кластере (размер кластера) определяется балансом потока атомов к поверхности кластера и потока испарения атомов с поверхности кластера и образует уравнение роста:

$$\frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot C - K_2(T), \quad (1)$$

где

$$K_1 = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{M}} \cdot \frac{r_w^3}{3} \cdot \frac{\rho}{M},$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{M}} \cdot \frac{r_w^3}{3} \cdot \frac{p_{atm}}{k \cdot T_{cl}} \cdot \exp\left(\frac{L}{R \cdot T_b} - \frac{L}{R \cdot T_{cl}}\right) \cdot \left(1 + \frac{2\sigma}{a \cdot \rho_{liq}} \cdot \frac{M}{kT_{cl}}\right),$$

где  $a$  – радиус кластера,  $C$  – концентрация металлических паров на поверхности кластера,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура газовой смеси,  $M$  – атомная масса испаряемого металла,  $r_w$  – радиус Вигнера-Зейтса (модель жидкой капли),  $\rho$  – плотность газовой смеси,  $p_{atm}$  – атмосферное давление,  $T_{cl}$  – температура поверхности кластера,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $L$  – удельная теплота испарения материала,  $T_b$  – температура кипения материала,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла,  $\rho_{liq}$  – плотность жидкого металла. Так как рост кластера происходит за счет атомов металла, приходящих из объема газовой смеси, то процесс описывается уравнением диффузии

$$\frac{dC}{dt} = D \Delta C = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right)$$

с граничными условиями на поверхности растущего кластера (при  $r = a$ )

$$D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=a} = K_1(T) \cdot C \Big|_{r=a} - K_2(T).$$

Концентрация атомов металла на значительном расстоянии от растущих кластеров определяется средним значением  $C_0$  (из решения задачи о смешении [4]):

$$C \Big|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow C_0.$$

Используя стандартные методы математической физики при решении уравнения диффузии, для концентрации на поверхности кластера получим:

$$C = C_0 - 2 \cdot (K_1 \cdot C_0 - K_2) \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot D}} - (K_1 \cdot C_0 - K_2) \cdot \left( \frac{1}{a} - \frac{K_1}{D} \right) \cdot \int_0^t \exp\left( \left( \frac{1}{a} - \frac{K_1}{D} \right)^2 \cdot D \cdot (t - \tau) \right) \cdot \operatorname{Erfc} \left( \left( \frac{1}{a} - \frac{K_1}{D} \right) \cdot \sqrt{D \cdot (t - \tau)} \right) d\tau.$$

Это выражение может быть упрощено за счет использования внутренней структуры и характерных масштабов значений под знаком интеграла. С учетом взаимного влияния растущих кластеров поверхностная концентрация определяется следующим выражением.

$$C = C_0 - \frac{a(t)^3}{a_{lim}^3} C_0 - 2 \cdot (K_1 \cdot C_0 - K_2) \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot D}} + \frac{a_1}{p} \frac{1}{D \left( \frac{1}{a} + \frac{K_1}{D} \right)} \ln \left( p \left( \frac{1}{a} + \frac{K_1}{D} \right) \sqrt{Dt} + 1 \right), \quad (2)$$

где  $a_1 = 0,348$ ;  $p = 0,47$ ,  $a_{lim}$  – средний размер кластера, определяемый из функции распределения кластеров по размеру.

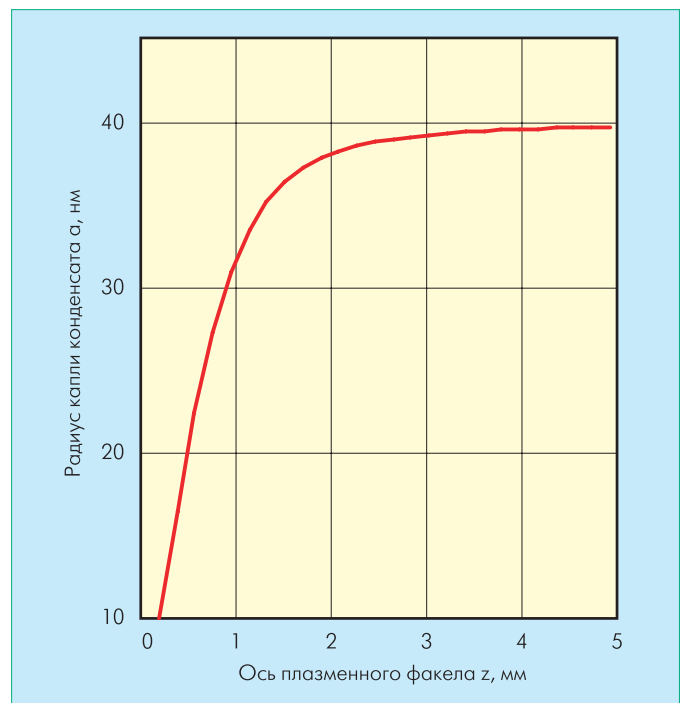


Рис.1 Динамика роста капли конденсата при ее движении вдоль оси плазменного факела

Вместе с уравнением роста (1) выражение (2) образует систему, решение которой дает значение концентрации железа пароплазменной фазе и размера кластера конденсированной фазы в любой момент времени. Динамика роста капли конденсата при ее движении вдоль продольной оси  $z$  плазменного факела представлена на рис.1.

За счет поглощения высокоэнергетичных электронов и испускания "холодных" электронов термоэмиссии конденсированная фаза является фактором, понижающим среднюю энергию  $\epsilon$  электронов. Для учета этого эффекта в кинетическое уравнение для спектра электронов был добавлен член, описывающий электронный обмен "горячих" плазменных электронов, падающих на поверхность частиц конденсата, на "холодные" термоэлектроны. Концентрация и размеры частиц конденсата определялись по описанной выше методике. Расчеты показывают снижение средней энергии  $\epsilon$  электронов и уменьшение общего числа свободных электронов в плазме, а также изменение формы их энергетического спектра (рис.2) при учете влияния конденсата. Степень конденсации определяет, какой процент от общей концентрации атомов в пароплазменном факеле находится в конденсированной фазе.

Совместное решение задачи о диффузии металлических паров к поверхности растущих кластеров конденсированной фазы и кинетики роста самого кластера позволяют количес-

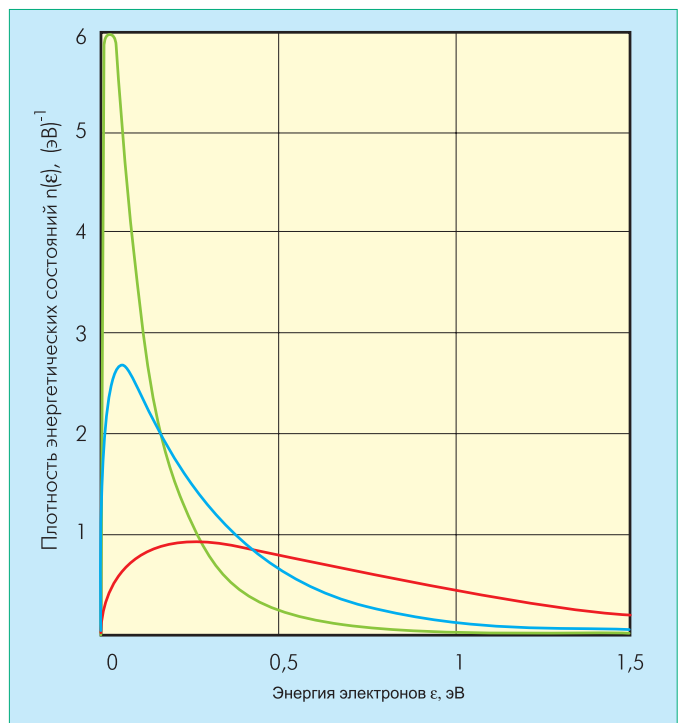
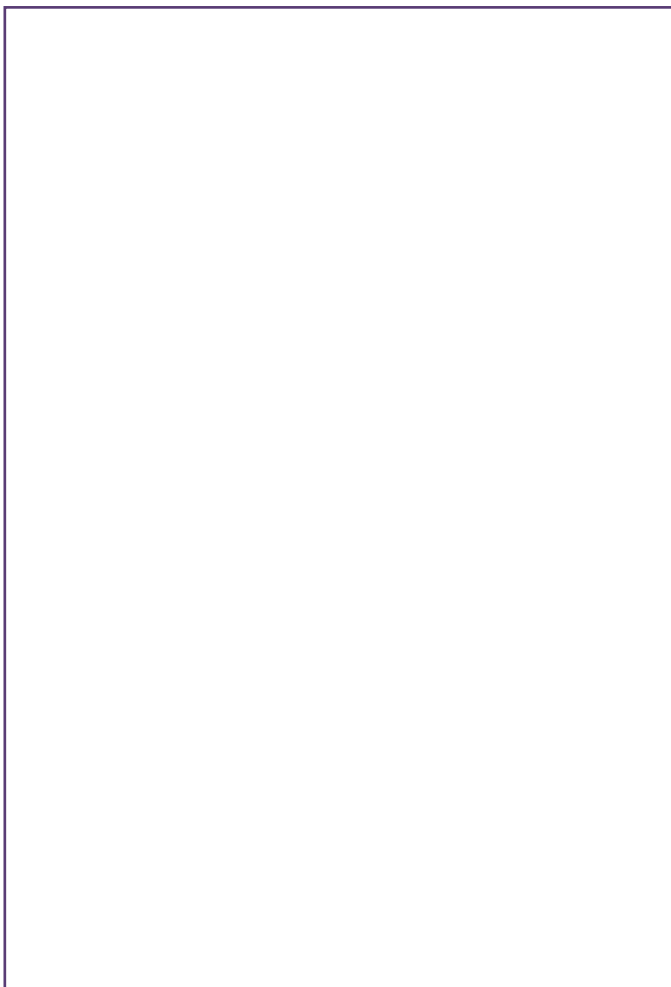


Рис.2 Энергетический спектр электронов: красная линия – без конденсации; синяя линия – степень конденсации 5%; зеленая линия – степень конденсации 10%

твенно оценить влияние процесса конденсации на концентрационные поля в плазменном факеле и, как следствие, на объемное тепловыделение в плазменном факеле, которое также зависит от электропроводности плазмы и коэффициента поглощения плазмой лазерного излучения.

Макроскопические характеристики плазмы, в свою очередь, определяются общим числом свободных электронов. Конденсация пересыщенного металлического пара, вылетающего из парогазового канала при лазерно-дуговом воздействии на материалы, существенно изменяет энергетический спектр плазменных электронов и значительно снижает степень ионизации плазмы, обеспечивающей формирование проводящего канала для электрической дуги.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dilthey U., Turichin G., Lopota V. et al. Kinetic description of keyhole plasma in laser welding. – J.Phys.D, 2000-33, №21, с. 2747–2753.
2. Turichin G., Dilthey U., Zemlyakov E., et al. Modeling of hybrid laser-arc discharge kinetics in the metal vapor jet, flowing to inert gas during hybrid welding with deep penetration. – Proceedings of 18-th Meeting on Mathematical Modeling of Materials Processing with Lasers, 2005.
3. Turichin G., Valdaytseva E., Zemlyakov E., et al. Boundary layer model of optic- arc discharge above the work-piece during hybrid welding.– Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, 2005.
4. Туричин Г., Григорьев А., Земляков Е. и др. Особенности формирования плазменного факела при гибридной лазерно-дуговой сварке. – Теплофизика высоких температур, 2006г,т 44, № 5, с.655–663.