

УДК 621.373.533.9

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-47-56>

ДИНАМИКА ЛАЗЕРНОЙ ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. Н. КУПО¹, В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ², Н. Н. ФЕДОСЕНКО¹

¹Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»,
Республика Беларусь

²ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга
«Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь

Исследовано влияние параметров лазерного излучения на структуру и геометрию лазерного эрозионного факела, предложена полумпирическая модель указанного процесса. Изучены закономерности формирования алмазоподобных углеродных пленок методом лазерного распыления и ионно-лучевого синтеза графита. Установлены теоретически и подтверждены экспериментально режимы нанесения углеродных алмазоподобных пленок данным комбинированным методом. Получена приемлемая воспроизводимость результатов при максимальной скорости осаждения 30 Å/с.

Ключевые слова: алмазоподобные покрытия, лазерное излучение, лазерный эрозионный факел, тонкопленочные покрытия.

Для цитирования. Купо, А. Н. Динамика лазерной эрозионной плазмы при формировании углеродных алмазоподобных покрытий / А. Н. Купо, В. А. Емельянов, Н. Н. Федосенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 2 (97). – С. 47–56. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-47-56>

DYNAMICS OF LASER EROSION PLASMA DURING THE FORMATION OF CARBON DIAMOND-LIKE COATINGS

A. N. KUPO¹, V. A. EMEL'YANOV², N. N. FEDOSENKO¹

¹Francisk Skorina Gomel State University,
the Republic of Belarus

²JSC “INTEGRAL” – manager holding company
“INTEGRAL”, Minsk, the Republic of Belarus

The influence of laser radiation parameters on the structure and geometry of the laser erosion plume has been studied, and a semi-empirical model of this process has been proposed. The patterns of formation of diamond-like carbon films by laser sputtering and ion-beam synthesis of graphite have been studied. The modes of carbon diamond-like films application by this combined method were established theoretically and experimentally confirmed. Acceptable reproducibility of results was obtained at maximum deposition rate 30 Å/c.

Keywords: diamond-like coatings, laser radiation, laser erosion plume, thin-film coatings.

For citation. Kupo A. N., Emelyanov V. A., Fedosenko N. N. Dynamics of laser erosion plasma during the formation of carbon diamond-like coatings. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 2 (97), pp. 47–56 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-47-56>

Введение

Алмазоподобные покрытия (АПП) представляют собой пленки аморфного углерода, содержащие определенную концентрацию sp^3 -связанных атомов. Такие покрытия характеризуются высокой механической твердостью и износостойкостью и, кроме того, высокой стабильностью этих свойств при повышенных температурных и других агрессивных воздействиях. Это объясняет их широкое применение в качестве защитно-декоративных и упрочняющих покрытий механических деталей и узлов различного назначения. Получаемые в настоящее время АПП содержат примеси, появляющиеся как в результате особенностей методов получения, так и вводимые намеренно для придания им тех или иных свойств. Различные формы sp^3 -углерода могут наноситься вакуумным напылением практически на любые подложки [1–8].

Основными задачами, которые нужно решить на пути совершенствования существующих и разработки новых методов формирования АПП, являются низкие скорости нанесения АПП для традиционных ионно-лучевых и плазменных методов, небольшие размеры наносимых покрытий для лазерных методов, а также неуправляемая концентрация в полученных АПП различных аллотропных модификаций углерода [3, 6–9]. Этим недостаткам в значительной мере лишен комбинированный метод, сочетающий лазерную и ионно-лучевую технологии [10].

Целью данной работы является исследование режимов формирования алмазоподобных пленок комбинированным методом с целью выявления закономерностей, влияющих на повышение содержания алмазной sp^3 -фазы при высоких скоростях осаждения.

Техника и методика эксперимента

Исследование процесса получения АПП комбинированным методом, включающим ионно-лучевой источник типа АИДА и технологические лазеры, работающие в инфракрасном диапазоне, проводилось в вакуумной камере установки УВН-73П-2. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

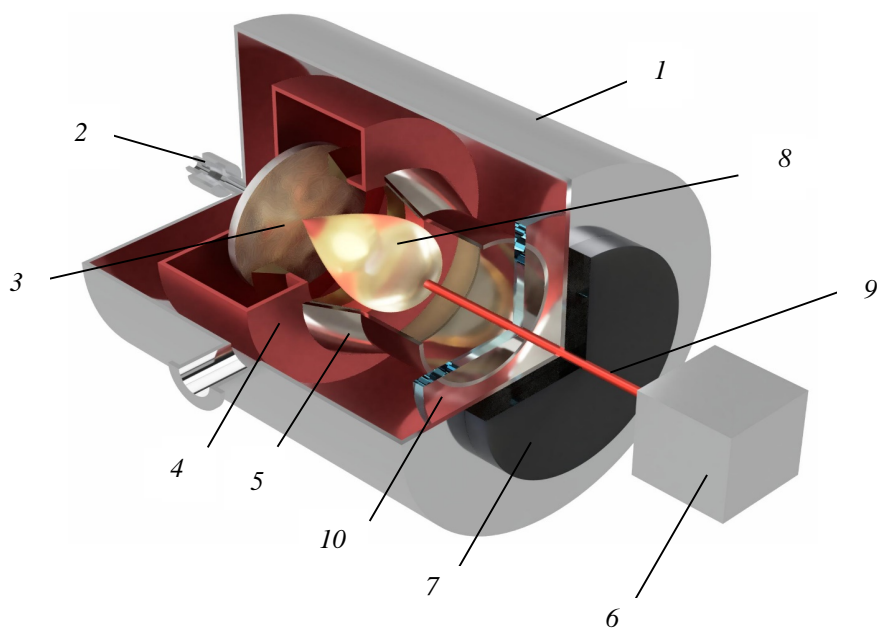


Рис. 1. Схема вакуумной экспериментальной установки для формирования алмазоподобных покрытий комбинированным методом

Истечение продуктов эрозии из зоны действия лазерного излучения (ЛИ) происходит в определенных пространственно-временных границах, образуя в вакууме лазерный эрозивный факел (ЛЭФ), который имеет сложную структуру, определяемую параметрами ЛИ и теплофизическими характеристиками материала мишени [11–13]. Общая схема структуры в квазистационарном режиме показана на рис. 2.

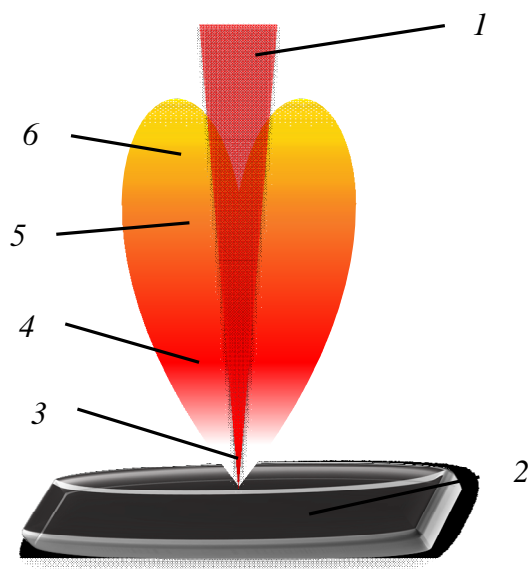


Рис. 2. Структура лазерного эрозивного факела

Лазерное излучение 1, сфокусированное на поверхности графитовой мишени 2, формирует ЛЭФ, чью структуру можно разделить на определенные зоны. К ним относятся плотное плазменное ядро 3, в котором присутствуют, как будет показано ниже, частицы углерода с характерными для алмаза связями, за ними следует слой быстрых ионов 4 сравнительно малой плотности, линия нулевого потенциала 5 отделяет этот слой от внешней оболочки ЛЭФ 6, состоящей из быстрых электронов.

Таким образом, в начале на подложку поступают высокоэнергетичные (>15 эВ) ионы аргона и углерода и распыляют часть поверхностных атомов материала подложки (металла). В результате взаимодействия падающего потока эрозивных частиц с атомами, выбитыми с поверхности, при определенных условиях может быть образована «соударительная» область с повышенной температурой и концентрацией частиц, препятствующая прямому прохождению напыляемого материала подложки. В таком случае рост пленки начинается после образования «термализованной» области [13], непосредственно прилегающей к поверхности подложки, являющейся источником частиц, становящихся зародышами новой конденсированной фазы.

Скорость конденсации со временем растет и с момента, когда она превышает скорость поступления частиц с подложки, «термализованный» слой начинает распадаться. После его окончательного исчезновения рост пленки происходит из прямого потока, испаренного с поверхности мишени, энергия частиц которого к тому времени уменьшается до 10 эВ.

Очевидно, что для получения АПП с высоким содержанием алмазной фазы при импульсной лазерной конденсации необходимо продлить время жизни «термализованной» области, т. е. предотвратить осаждение на поверхность подложки частиц с энергиями ниже 14,6 эВ, которые как раз и приводят к образованию в формирующейся пленке паразитной фазы аморфного углерода.

Процесс получения алмазоподобных углеродных пленок при их конденсации из лазерной эрозионной плазмы характеризуется крайне неравновесными условиями. Вследствие чего конденсирующиеся аморфные структуры в зависимости от технологических параметров имеют различный ближний порядок, фазовые свойства и отличаются определенным соотношением атомов углерода с sp -, sp^2 - и sp^3 -гибридизацией электронов валентных оболочек, свойственной алмазу, графиту и карбину соответственно. Исходя из этого основной задачей при формировании АПП лазерным методом является селективное формирование на поверхности подложки преимущественно алмазоподобной фазы.

Высокие энергии ионных пучков (> 50 эВ) накладывают ограничение на скорость роста алмазоподобных пленок, приводят к неоднородному составу слоев, в которых наряду с аморфной фазой содержатся кристаллы алмаза и карбина. Поэтому представляет интерес смещение энергетического распределения частиц ЛЭФ ниже порога ионизации графита. При плотности мощности теплового источника ЛИ на поверхности мишени $q = 8 \cdot 10^{11}$ Вт/м², соответствующей порогу абляции графита, средние энергии нейтральных частиц составляют 2 эВ, что близко к энергии σ -связи атомов в алмазе (3,6 эВ).

Экспериментально установлено, что каждому типу лазера (ГОС-301, Г-Ои-16-1) при одинаковой плотности мощности q на поверхности мишени соответствует уникальное расстояние «мишень – подложка», при котором формируется АПП. Это объясняется тем, что этот процесс происходит только в случае расположения подложек в определенной фазе ЛЭФ, когда на поверхности подложки возникает термализованная область. Малейшее изменение параметров лазерного импульса видоизменяет форму ЛЭФ, что и задает в конечном счете при формировании АПП строго определенное для каждого типа ЛИ расстояние «мишень – подложка».

Плотность мощности лазерного излучения q при формировании АПП выбиралась в пределах $(0,4-6,0)10^{12}$ Вт/м², что обеспечивает образование лазерного эрозионного факела, термализованной области над поверхностью подложки и, следовательно, позволяет получать АПП заданного качества. При плотности мощности, меньшей чем $0,4 \cdot 10^{12}$ Вт/м², перераспределяется энергетический баланс во время процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом мишени. Теплопроводность не успевает отводить в глубь мишени всю энергию, выделяющуюся в виде тепла в поверхностном слое, и часть лазерной энергии, поглощенной мишенью, расходуется на механический выброс материала мишени. Именно тогда получается покрытие из аморфного углерода. В интервале плотностей мощности $(0,4-6,0)10^{12}$ Вт/м² энергия, расходуемая на нагрев, плавление и испарение, становится малой по сравнению с энергией, необходимой для ионизации и нагрева образующейся при испарении плазмы. С этого момента образуется ЛЭФ, содержащий ионы, высоко- и низкоэнергетические частицы вещества мишени. Углеродные радикалы в результате образования ЛЭФ находятся в возбужденном состоянии. Если такое возбужденное состояние сохраняется до момента возникновения кристаллических зародышей или начала роста пленки, на поверхности подложки формируется алмазоподобная sp^3 -структура. Превышение плотности мощности более чем $6 \cdot 10^{12}$ Вт/м² вызывает сильную ионизацию парогазовой смеси, образование плазмы при этом экранирует воздействие ЛИ на мишень за счет интенсивного поглощения лазерного излучения самой эрозионной плазмой и процесс испарения материала мишени можно рассматривать как сублимацию, что приводит к заметному ухудшению качества полученных АПП.

Лазерный метод формирования тонких пленок в вакууме имеет одно бесспорное преимущество перед другими методами напыления – это высокий рабочий вакуум,

что позволяет обеспечивать высокую чистоту процесса. Для реализации метода лазерного формирования АПП рабочий вакуум составляет 10^{-3} – 10^{-4} Па. Это создает предпосылки для формирования АПП с минимальной долей примесей остаточного газа. Более низкий рабочий вакуум приводит к дополнительным включениям в формируемую пленочную структуру кислорода, водорода и азота из атмосферы остаточного газа, что отрицательно сказывается на качестве получаемых АПП. Таким образом, столь высокий рабочий вакуум в лазерном методе формирования АПП обусловлен минимизацией возможных примесей в процессе напыления.

Существенное влияние на структуру алмазоподобной пленки при лазерном методе формирования оказывает длительность импульса τ ЛИ. В режиме миллисекундных импульсов, когда поглощением лазерного излучения в паре можно пренебречь, структурное совершенство пленок определяется соотношением скорости поступления конденсата на подложку и энергией конденсирующихся частиц. При работе лазера в режиме наносекундных импульсов испарение сопровождается существенным поглощением лазерного излучения в плазме и, следовательно, в ЛЭФ появляются в большом количестве ионы, которые создают дополнительную бомбардировку поверхности конденсации и могут быть в значительной мере ответственными за ориентированный рост углеродной пленки, а также оказывать некоторое влияние на образование и существование термализованной области. Длительности лазерных импульсов в интервале 0,5–1 мс обеспечивают наиболее эффективный прогрев мишени по глубине и соответственно вынос наибольшей массы вещества мишени в виде продуктов испарения, что гарантирует максимальные для данного процесса скорости испарения. Длительность импульса $\tau > 1$ мс нежелательна ввиду возможного превалирования механических частиц вещества мишени, вырывааемых из кратера мишени, которые разрушают поверхность пленки при соударениях. Такая длительность становится причиной образования кратера на поверхности мишени большой глубины, что в конечном итоге приводит к сужению диаграммы раздета пара и уменьшению эффективной зоны напыления. Длительность импульса менее 0,5 мс обуславливает сильную неоднородность лазерного эрозионного факела вследствие нерегулярности структуры самого импульса. В результате этого значительно снижается воспроизводимость результатов и характеристик пленок.

Теоретическое обоснование метода и обсуждение

Для ЛЭФ, сформированного как в непрерывном, так и в импульсном режимах генерации ЛИ, существующего более 0,1 мс, установление локального термодинамического равновесия (ЛТР) лимитируется процессами термодиффузии. Для импульсного режима при длительности импульса ЛИ менее 0,1 мс существование ЛТР связано с быстрой электронной компонентой. Выравнивание электронной T_e и ионной T_i температур происходит за время [14, 15]:

$$\tau_{ei} = \frac{3,15 \cdot 10^8 A T^{3/2}}{n_i \ln \lambda} \geq 10^{-9}, \quad (1)$$

где A – атомная масса плазмообразующего иона; n_i – концентрация ионов; $\ln \lambda$ – кулоновский логарифм [16]; τ_{ei} – время в секундах (верхняя граница τ_{ei} для различных материалов и параметров ЛИ не превышает 10^{-7} с [14]).

Несмотря на возможность отсутствия ЛТР в условиях короткого и высокоинтенсивного импульса ЛИ, перенос энергии в ЛЭФ осуществляется по механизму термодиффузии благодаря высокой (около сотен эВ) температуре плазмы ЛЭФ.

Время выравнивания электронной и ионной температур в ЛЭФ в случае наносекундных импульсов ЛИ можно оценить по следующей формуле [14]:

$$\tau_{ei} = \frac{3}{8\sqrt{2\pi}} \frac{m_i T_e^{3/2}}{m_e^{1/2} e^4 n_i z^2 \ln \lambda}, \quad (2)$$

где m_i , m_e – массы иона и электрона соответственно; e – элементарный заряд; z – заряд иона. Например, для легких ионов и $T_e \approx 200$ эВ это время составляет величину около $3 \cdot 10^{-10}$ с.

Стационарность основных процессов, протекающих в ЛЭФ, позволяет рассматривать факел как самостоятельно существующую сплошную среду, имеющую сложную пространственно-временную структуру, границы которой превышают область видимого свечения. Компоненты факела, детектируемые за пределами видимого диапазона, более ярко выражены для высоких значений q и малых τ ЛИ.

Быстрые частицы с эффективной температурой ≈ 2000 К разлетаются преимущественно по нормали к поверхности в конус с углом менее 40° . Угловое распределение низкоэнергетических частиц с эффективной температурой ≈ 350 К описывается косинусоидальным законом Кнудсена и близко к сферическому.

При разлете ЛЭФ в вакуум в условиях свободного расширения разреженной плазмы, характерного для умеренных плотностей мощности $q = (10^{11} - 10^{12})$ Вт/м² и коротких длительностей импульсов ЛИ $\tau = (20 - 40)$ нс, хорошо известно образование быстрых ионов [14].

Эмиссия ионов остается заметной при расширении плазменного сгустка на отрезке ΔL , который можно оценить из соотношения

$$\tau_i = \frac{\Delta L}{\sqrt{2eU_i}} \sqrt{M}, \quad (3)$$

где τ_i – длительность ионного импульса; eU_i – энергия иона.

Различные неоднородности ЛЭФ наиболее заметны на начальном этапе его существования. Они уменьшаются, как по количеству, так и по интенсивности своего проявления, по мере установления квазистационарного распределения плотности факела, особенно на стадии его распада, но не исчезают и в стационарном состоянии лазерной плазмы.

Более заметно влияние газовой среды и ее давления проявляется в виде формирования струйного течения лазерной плазмы [15]. Влияние буферного газа становится заметным при давлении $P \sim P_1 \approx 3,99$ Па. В менее плотной среде характер разлета аналогичен разлету в вакуум. При повышении давления в интервале $P_1 < P < P_2 \approx 26,63$ Па происходит резкое сужение потока плазмы и формируется сверхзвуковое или близкое к сверхзвуковому струйное течение. В интервале давлений $P_2 < P < P_3 \approx 53,26$ Па основная струя разбивается и возникает двухструйное течение. Увеличение давления свыше P_3 приводит к многоструйному течению. Разбиение плазменного потока на струи сопровождается конденсацией и образованием капель жидкой фазы. В ряде случаев отмечается, что диаметр конденсированных частиц уменьшается с ростом расстояния от мишени, что свидетельствует о дополнительном испарении жидких капель по мере их движения навстречу ЛИ.

Поглощение ЛИ в плазме ЛЭФ достаточно хорошо описано и может быть представлено следующей моделью [13–15]: небольшая часть энергии идет на первоначальную однократную ионизацию слоя толщиной по порядку величины, равной длине волны ЛИ; одновременно с ионизацией происходит нагрев плазмы до температуры в несколько электронвольт, который прекращается, когда плазменная частота:

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e} \right)^{1/2} \quad (4)$$

становится больше частоты ω лазерного излучения, и остальная часть энергии лазерного импульса эффективно отражается; сильное отражение существует до тех пор, пока плотность частиц из-за расширения факела не падает до величины, удовлетворявшей неравенству

$$\omega > \left(\frac{4\pi e^2 N\rho}{m_e} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где N – среднее число электронов в расчете на один атом исходного вещества мишени; ρ – суммарная плотность атомов и ионов в плазме.

Представленное состояние существует или в течение одного достаточно длинного интенсивного импульса, или при большой частоте следования импульсов ЛИ. Когда плотность плазмы становится меньше и равенство (4) не выполняется, ЛИ начинает эффективно поглощаться и разогревать ЛЭФ. При плотности плазмы, которой соответствует неравенство $\omega \ll \omega_p$, факел становится прозрачным для ЛИ.

Для ЛИ в диапазоне плотности мощности ($10^{11} \leq q \leq 10^{12}$) Вт/м² большая часть падающей на мишень энергии ЛИ поглощается в области факела с плазмой пониженной плотности при обратном тормозном излучении. Коэффициент поглощения определяется через электронную плотность n_e и температуру T_e выражением

$$a = (A\lambda^2 n_e^2 T_e^2)^{-3/2}, \quad (6)$$

где A – постоянная, учитывающая неустойчивости в плазме и наличие в ней конденсированных частиц.

В условиях низкой и средней плотности мощности ($q \leq 10^{11}$ Вт/м²) поглощение падающего излучения в продуктах эрозии становится определяющим для появления плазмы в ЛЭФ: в силу нелинейности коэффициента поглощения в области первой ионизации существуют пороговые условия плазмообразования.

При температуре плазмы (10–30) эВ основная часть теплового излучения приходится на область вакуумного ультрафиолета ($1 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^{-2}$) мкм. При увеличении плотности мощности ЛИ $q \geq 10^{13}$ Вт/м² в излучении плазмы ЛЭФ становится заметным рентгеновское излучение [14–16].

Приведенные данные показывают, что учет традиционных для лазерной технологии явлений, таких как образование и поступление жидкой фазы в факел, условия нагрева и остывания мишени, распределение компонентов факела в пространстве, динамика факела позволяет делать предварительный выбор лазера и оценить режим его работы для реализации напыления.

Заключение

На основании экспериментальных и теоретических исследований установлены оптимальные режимы формирования АПП комбинированным методом, сочетающим использование ЛИ для формирования ЛЭФ, и ионно-лучевого источника, обеспечивающего как предобработку (чистку) подложек, так и сопутствующую чистоту процесса вакуумного напыления АПП, заключающуюся в воздействии на формирующуюся алмазосодержащую пленку ионов инертного газа с целью снижения концентраций примесей и дефектов в конденсированной фазе. Указанные режимы представляют собой остаточное давление в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па, ЛИ с дли-

ной волны $\lambda = 1,06$ мкм, максимальной энергией в импульсе $W = 300$ Дж, длительностью импульса $\tau = 0,6 - 0,8 \cdot \text{мс}$ и плотностью мощности теплового источника на поверхности мишени $(0,4-6,0)10^{12}$ Вт/м². Параметры разряда ионного источника: $U_a = 150$ В, $I_a = 2-4$ А. Инертный газ (аргон) в ионный источник подается до давления в вакуумной камере $P = 1-3 \cdot 10^{-2}$ Па. Напыление АПП осуществлялось при работающем ионном источнике.

Установленные режимы нанесения АПП в комбинированном методе позволяют получать АПП с воспроизводимыми свойствами со скоростями до 30 Å/с.

Литература

1. Vetter, J. 60 years of DLC coatings: historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications / J. Vetter // Surf. Coat. Technol. – 2014. – Vol. 257. – P. 213–240.
2. Neuville, S. New application perspective for tetrahedral amorphous carbon coatings / S. Neuville // Sci. Connect. – 2014. – Iss. 8. – P. 1–27.
3. Evaristo, M. Room and High Temperature Tribological Behaviour of W-DLC Coatings Produced by DCMS and Hybrid DCMS-HiPIMS Configuration / M. Evaristo, F. Fernandes, A. Cavaleiro // Coatings. – 2020. – Vol. 10, iss. 4. – P. 319–334.
4. Mechanical characterization of segment-structured hydrogen-free a-C films fabricated by filtered cathodic vacuum arc method / S. Kondo [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2015. – Vol. 278. – P. 71–79.
5. Microstructural and tribological characterization of DLC coating by in-situ duplex plasma nitriding and arc ion plating / R. Lan [et al.] // Diam. Relat. Mater. – 2019. – Vol. 98. – P. 104–117.
6. Tuning the tribological property of PLD deposited DLC-Au nanocomposite thin films / M. Panda [et al.] // Ceram. Int. – 2019. – Vol. 45. – P. 8847–8855.
7. Chemical Structural Analysis of Diamondlike Carbon Films with Different Electrical Resistivities by X-ray Photoelectron Spectroscopy / S. Takabayashi [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 47. – P. 3376–3379.
8. The role of sp^2/sp^3 hybrid carbon regulation in the nonlinear optical properties of graphene oxide materials / S. Wang [et al.] // RSC Adv. – 2017. – Iss. 84. – P. 53643–53652.
9. Fiaschi, G. A chemical, mechanical, and tribological analysis of DLC coatings deposited by magnetron sputtering / G. Fiaschi [et al.] // Lubricants. – 2019. – Vol. 7, iss. 4. – P. 38–49.
10. Шалупаев, С. В. Лазерное осаждение алмазоподобных покрытий // С. В. Шалупаев, Н. Н. Федосенко, В. П. Морозов / Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2001. – № 6. – С. 123–126.
11. Кузнецов, П. М. Особенности колебаний интенсивности эрозионного факела при воздействии лазерного излучения на металлическую поверхность / П. М. Кузнецов, В. А. Федоров. // Вестн. Том. гос. ун-та. Химия. – 2013. – Т. 18, вып. 1. – С. 144–147.
12. Зондовые исследования эрозионного факела при абляции тантала в вакууме излучением эксимерного лазера с длиной волны 308 нм / О. А. Новодворский [и др.] // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 2. – С. 159–163.

13. Гончаров, В. К. Пространственные и временные характеристики эрозионного лазерного факела на графитовой мишени в вакууме / В. К. Гончаров, М. В. Пузырев, В. Ю. Ступакевич // Вестн. БГУ. – 2016. – Сер. 1, № 1. – С. 79–83.
14. Хомкин, А. Л. Исследования неидеальной плазмы на страницах ТВТ за последние 50 лет (1963–2012). Библиографический обзор (Обзор) / А. Л. Хомкин, Л. Г. Дьячков, А. С. Шумихин // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, вып. 3. – С. 326–344.
15. Стариковский, А. Ю. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме / А. Ю. Стариковский, Н. Л. Александров // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47, № 2. – С. 126–192.
16. Хомкин, А. Л. Кулоновский логарифм при расчете проводимости плазмы: аналитическая теория и численное моделирование / А. Л. Хомкин, А. С. Шумихин // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60, вып. 4. – С. 483–487.

References

1. Vetter J. 60 years of DLC coatings: historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 257, pp. 213–240.
2. Neuville S. New application perspective for tetrahedral amorphous carbon coatings. *Connection Science*, 2014, iss. 8, pp. 1–27.
3. Evaristo M., Fernandes F., Cavaleiro A. Room and High Temperature Tribological Behaviour of W-DLC Coatings Produced by DCMS and Hybrid DCMS-HiPIMS Configuration. *Coatings*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 319–334.
4. Kondo S., Liza S., Ohtake N., Akasaka H., Matsuo M., Iwamoto Y. Mechanical characterization of segment-structured hydrogen-free a-C films fabricated by filtered cathodic vacuum arc method. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 278, pp. 71–79.
5. Lan R., Ma Z., Wang C., Lu G., Yuan Y., Shi C. Microstructural and tribological characterization of DLC coating by in-situ duplex plasma nitriding and arc ion plating. *Diamond and Related Materials*, 2019, vol. 98, pp. 104–117.
6. Panda M., Krishnan R., Krishna N. G., Amirthapandian S., Magudapathy P., Kamruddin M. Tuning the tribological property of PLD deposited DLC-Au nanocomposite thin films. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, pp. 8847–8855.
7. Takabayashi S., Okamoto K., Shimada K., Motomitsu K., Motoyama H., Nakatani T., Sakaue H., Suzuki H., Takahagi T. Chemical Structural Analysis of Diamondlike Carbon Films with Different Electrical Resistivities by X-ray Photoelectron Spectroscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 47, pp. 3376–3379.
8. Wang S., Dong Y., He C., Gao Y., Jia N., Chen Z., Song W. The role of sp^2/sp^3 hybrid carbon regulation in the nonlinear optical properties of graphene oxide materials. *RSC Advances*, 2017, iss. 7, pp. 53643–53652.
9. Fiaschi G., Rota A., Ballestrazzi A., Marchetto D., Vezzalini E., Valeri S. A chemical, mechanical, and tribological analysis of DLC coatings deposited by magnetron sputtering. *Lubricants*, 2019, vol. 7, iss. 4, pp. 38–49.
10. Shalupaev S. V., Fedosenko N. N., Morozov V. P. Laser deposition of diamond-like coatings. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny*, 2001, no. 6, pp. 123–126 (in Russian).

11. Kuznetsov P. M., Fedorov V. A. Features of fluctuations in the intensity of an erosion torch under the influence of laser radiation on a metal surface. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*, 2013, vol. 18, iss. 1, pp. 144–147 (in Russian).
12. Novodvorsky O. A., Filippova E. O., Khramova O. D., Shevelev A. K., Wenzel K., Barta I. V. Probe studies of an erosion plume during ablation of tantalum in a vacuum using excimer laser radiation with a wavelength of 308 nm. *Quantum electronics*, 2001, vol. 31, no. 2, pp. 159–163 (in Russian).
13. Goncharov V. K., Puzyrev M. V., Stupakevich V. Yu. Spatial and temporal characteristics of an erosion laser torch on a graphite target in a vacuum. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*, 2016, no. 1, pp. 79–83 (in Russian).
14. Khomkin A. L., D'yachkov L. G., Shumikhin A. S. Studies of non-ideal plasma on the pages of TVT over the last 50 years (1963–2012). Bibliographic review (Review). *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2013, vol. 51, iss. 3, pp. 326–344 (in Russian).
15. Starikovskii A. Yu., Aleksandrov N. L. Control of gas-dynamic flows using ultra-fast local heating in a highly nonequilibrium pulsed plasma. *Fizika plazmy = Plasma Physics Reports*, 2021, vol. 47, no. 2, pp. 126–192 (in Russian).
16. Khomkin A. L., Shumikhin A. S. Coulomb logarithm in calculating plasma conductivity: analytical theory and numerical modeling. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2022, vol. 60, iss. 4, pp. 483–487 (in Russian).

Поступила 10.06.2024