

УДК 538.951:620.3

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ РАЗРЯДА
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ
ИЗ СЕПАРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ
УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ****Д. Г. ПИЛИПЦОВ, Н. Н. ФЕДОСЕНКО***Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»,
Республика Беларусь***К. А. САХОВСКИЙ***Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель***С. Ю. ЧЕПКАСОВ***Учреждение образования «Новосибирский
государственный университет», Российская Федерация*

Углеродные покрытия наносились из сепарированных потоков импульсной углеродной плазмы при различном рабочем напряжении (200–450 В). В качестве сепаратора был использован криволинейный соленоид с углом поворота плазменного потока на 90°. Методом спектроскопии комбинационного рассеивания исследована структура покрытий, установлены механические свойства (твердость, модуль упругости, триботехнические параметры) осажденных покрытий. Определено, что при напряжении разряда, равном 350 В, наблюдается высокая разупорядоченность структуры покрытия, при этом покрытие характеризуется наибольшей твердостью, равной $20,5 \text{ ГПа}$, низкими значениями коэффициента трения, что определяет наименьший износ контртела $0,208 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3 / (\text{Н} \cdot \text{м})$. Применение криволинейного соленоида, включенного в анодную цепь импульсного генератора углеродной плазмы, позволяет эффективно разделять ионную и капельную компоненты покрытия, обеспечив при этом уменьшение количества макрочастиц в плазменном потоке, что приводит к снижению поверхностной шероховатости и позволяет получать покрытия с высоким содержанием sp^3 -гибридизированных атомов углерода. И как следствие этого происходит повышение твердости и модуля упругости этих покрытий.

Ключевые слова: углеродное покрытие, структура, механические свойства, легирование, метод вакуумного импульсного катодно-дугового испарения.

**DISCHARGE VOLTAGE EFFECT ON STRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON
COATINGS, PRECIPITATED FROM SEPARATED STREAMS
OF CARBON PLASMA****D. G. PILIPTSOV, N. N. FEDOSENKO***Educational Institution "Francisk Skorina Gomel
State University", the Republic of Belarus***K. A. SAHOVSKIY***Educational Institution "Belarusian State University
of Transport", Gomel***S. U. CHERKASOV***Educational institution "Novosibirsk State University",
the Russian Federation*

Carbon coatings were applied from separated streams of pulsed carbon plasma at different operating voltages (200–450 V). A curvilinear solenoid with a rotation angle of the plasma flow of 90° was used as a separator. Using Raman spectroscopy, the structure of the coatings was studied and the mechanical properties (hardness, elastic modulus, tribotechnical parameters) of the precipitated coatings were established. It has been found out that at a discharge voltage of 350 V, a high disorder of the coating structure is observed, while the coating is characterized by the highest hardness, equal to 20.5 GPa and low values of the friction coefficient, which determines the least wear of the counterbody $0,208 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The use of a curvilinear solenoid included in the anode circuit of a pulsed carbon plasma generator makes it possible to effectively separate the ionic and droplet components of the coating, while ensuring a reduction in the number of macroparticles in the plasma flow. It leads to a decrease in surface roughness and makes it possible to obtain coatings with a high content of sp^3 -hybridized atoms carbon, which results in high hardness and elasticity modulus.

Keywords: carbon coating, structure, mechanical properties, alloying, vacuum pulsed cathodic-arc evaporation method.

Введение

Углеродные покрытия ($a\text{-C}$), осаждаемые из потоков углеродной плазмы, широко используются в машиностроении для упрочнения узлов трения, что позволяет увеличить ресурс работы инструмента и технологической оснастки. Существенным недостатком плазменных потоков углеродной плазмы, формируемых в результате испарения графитового катода электрической дугой, является наличие в потоке углерода капельной фазы, представляющей собой агломераты микрочастиц графита, возникающих за счет эрозии катода при распылении его дуговым разрядом и существенно снижающих эксплуатационные свойства покрытий. Наряду с режимом горения дуги (импульсный или стационарный) на образование капельной фазы оказывают влияние пространственно-временные и энергетические параметры испарения, изменяя которые, можно регулировать количество частиц в потоке, а также их размеры.

Формирование твердых углеродных покрытий с применением импульсного дугового разряда позволяет получить поток ионов углерода с энергиями, необходимыми для формирования sp^3 -гибридизированных углеродных связей. При этом величина разрядного импульсного тока, которую возможно изменять, регулируя напряжение разряда, позволяет в достаточно широких пределах управлять плотностью ионного потока, а также энергией ионов углерода. Так, в работе [1] показано, что с увеличением тока от сотни до тысяч ампер энергия ионов углерода возрастает от 25 до 80 эВ. Также стоит отметить, что с целью оптимизации энергетических параметров ионного потока при осаждении покрытий из импульсных потоков углеродной плазмы не требуется дополнительной подачи напряжения смещения на подложку, что существенно упрощает конструкцию вакуумного оборудования [2].

Как показано в работе [3], свойства получаемых углеродных покрытий в зависимости от импульсной мощности, а также от других параметров процесса изменяются в широких пределах: микротвердость – от 40 до 150 ГПа; плотность – от 2,4 до 3,4 г/см³; удельное электросопротивление – от 10^3 до 10^{10} Ом · см; концентрация sp^3 -связей – от 15 до 70 %; температура начала структурных превращений – выше 600 °C [2].

С целью управления отношением капельной/ионной компонент в потоке импульсной углеродной плазмы применяют несколько технологических методов, таких, как изменение длительности и энергии разрядного импульса, использование электромагнитных фильтров, позволяющих управлять как перемещением катодных пятен на поверхности катода, так и осуществлять разделение ионной и капельной компонент потока на стадии испарения за счет их различного взаимодействия с внешними электрическими или магнитными полями. К таким сепараторам относятся устройства, осуществляющие и транспортировку, и разделение компонент плазменного потока.

Разработка и исследование энергетических режимов работы испарителя, содержащего сепарирующую систему, с целью определения оптимальных режимов осаждения покрытий является актуальной задачей.

Основная цель настоящей работы – исследование структуры, морфологии и механических свойств углеродных покрытий, осажденных из сепарированных потоков импульсной углеродной плазмы при различном напряжении разряда.

Оборудование и методы исследования

Покрытия из углерода были получены с использованием вакуумной установки УВНИПА-1-001, оснащенной ионным источником, вакуумно-дуговым источником металлической плазмы, импульсным источником углеродной плазмы, а также сепаратором плазмы.

В качестве сепаратора был использован криволинейный соленоид с углом поворота плазменного потока на 90° . Отличительной особенностью данного соленоида является его включение в электрическую схему блока питания импульсного генератора углеродной плазмы. При этом возникающее в соленоиде транспортирующее поле – импульсное и возникает оно в момент импульсного разряда. Геометрически сепаратор выполнен в виде части тора с внутренним диаметром 95 мм и длиной 380 мм.

Схема нанесения покрытий представлена на рис. 1.

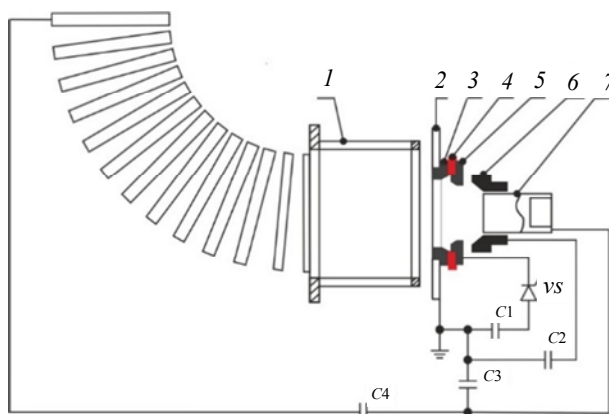


Рис. 1. Схема осаждения углеродных покрытий:
1 – анодный узел с фильтром; 2 – дополнительный анод;
3 – графитовое кольцо; 4 – изолирующая керамика;
5 – графитовый поджигающий электрод; 6 – электрод поджига;
7 – графитовый катод

Покрытия осаждали на полированные кремниевые подложки при комнатной температуре. Осаждение покрытий проходило при различных напряжениях импульсного дугового разряда (200–450 В) и постоянной частоте следования импульсов разряда, равной 5 Гц. Количество импульсов, определяющее толщину покрытия, составляло 3000.

Микроструктуру покрытий исследовали методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с помощью КР-микроскопа Senterra (Bruker). Возбуждение спектров осуществлялось излучением с длиной волны 532 нм и мощностью 10 или 20 мВт.

Триботехнические испытания проводили по схеме «сфера – плоскость» при обратно-поступательном перемещении индентора при нормальной нагрузке 1 Н, при температуре окружающей среды 23°C и относительной влажности 70 % и скорости

67,5 мм/с. Схема трения «сфера – плоскость» позволяет наиболее точно рассчитать площадь пятна контакта и величины контактного давления, а также исключить неизбежное влияние наклона индентора и пластины на геометрию контакта

Измерение механических параметров покрытий проводили с использованием наноиндентора «НаноСкан 4D» методом динамического механического анализа (DMA), являющегося одним из методов индентирования. В процессе индентирования на поступательное внедрение индентора накладываются гармонические колебания, что позволяет определить твердость и модуль упругости почти в каждой точке углубления индентора, т. е. получить практически непрерывные зависимости механических характеристик от глубины.

Морфологию покрытий изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режимах измерения топографии и фазового контраста с применением прибора Solver-PRO P47 (NT-MDT, Российская Федерация). Размер участка сканирования поверхности покрытий составлял 4×4 мкм. С использованием программного обеспечения Nova, входящего в комплекс Solver P47, определен средний размер зерна покрытия, а также параметры шероховатости Ra и Rz.

Полученные результаты и их анализ

Приведенные на рис. 2 спектры КР характерны для аморфных углеродных покрытий и представляют собой ассиметричный пик, расположенный в области от 1000 до 2000 см^{-1} , с центром, локализованным вблизи 1600 см^{-1} . Полученные спектры были представлены в виде суммы пиков, ответственных за различные типы колебаний атомов углерода в покрытии.

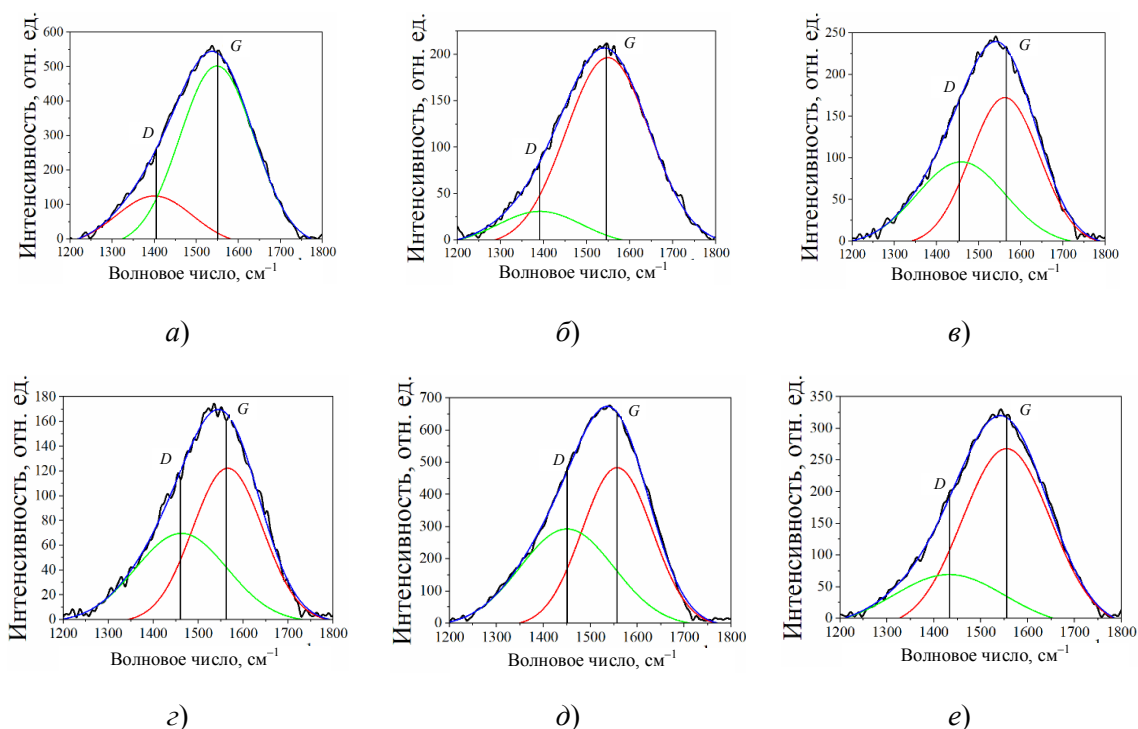


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеивания света покрытий, осажденных из сепарированных потоков углеродной плазмы при различном напряжении разряда:
а – 200 В; б – 250 В; в – 300 В; г – 350 В; д – 400 В; е – 450 В

В качестве основных параметров спектров, позволяющих судить об изменении структуры покрытий, выбраны отношения интенсивности D - и G -компонент, а также положение G -пика и его ширина. Результаты математической обработки даны в табл. 1.

Изменение энергетических условий формирования импульсного потока углеродной плазмы позволяет регулировать изменение их структуры (табл. 1).

Таблица 1

Параметры спектров комбинационного рассеивания света

Напряжение разряда, В	I_D / I_G	Положение G -пика, см^{-1}	Ширина G -пика, см^{-1}
200	0,31	1550,0	205,81
250	0,17	1549,0	228,4
300	0,72	1561,9	192,9
350	0,75	1565,5	183,9
400	0,82	1556,9	176,1
450	0,37	1554,6	220,7

Известно [4], что смещение положения G -пика в сторону больших волновых чисел происходит тогда, когда размер sp^2 -кластеров углерода уменьшается, а их количество и упорядоченность возрастают, что свидетельствует о снижении отношения sp^3/sp^2 . Установлено, что при напряжении 250 В значения положения пика G являются минимальными, что указывает на рост разупорядоченности и соответственно – рост sp^3 -фазы в покрытии.

Также известно, что значения ширины G -пика являются основным параметром, характеризующим структурный беспорядок, и определяются искажением угла связей между атомами углерода.

Рост отношения I_D/I_G предполагает увеличение количества упорядоченных ароматических колец в кластере и снижение одинарных связей в линейных С–С-цепочках [5]. Согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что при напряжении 400 В величина отношения I_D/I_G достигает максимального значения, что указывает на высокую концентрацию ароматических колец. При напряжении 250 В наблюдается минимальное значение I_D/I_G отношения. Анализ формы спектров, а также их основных параметров показал, что осаждение покрытий в условиях сепарации потока при напряжении разряда 250 В является оптимальным, поскольку формирует в покрытии максимальное содержание sp^3 -атомов углерода с высокой степенью структурного беспорядка. Также установлено, что с ростом напряжения разряда от 250 до 400 В отмечается уменьшение структурного беспорядка, указывающего на увеличение концентрации атомов углерода в состоянии sp^2 -гибридизации связей.

Результаты исследования поверхностной морфологии, выполненные методом атомно-силовой микроскопии, представлены на рис. 3.

Исследование поверхности покрытий, осажденных из сепарированных потоков при различном напряжении разряда, проводили с выделением на их поверхности площадок размером 4×4 мкм (рис. 3).

На поверхности углеродного покрытия, осажденного при напряжении разряда 200 В, присутствуют единичные структурные образования, что указывает на начало формирования сплошного покрытия за счет слияния островков, являющихся центрами конденсации. При этом размер зерна составляет 51,74 нм. В результате анализе участка поверхности 1×1 мкм установлено снижение размера зерна до 11,34 нм (табл. 2).

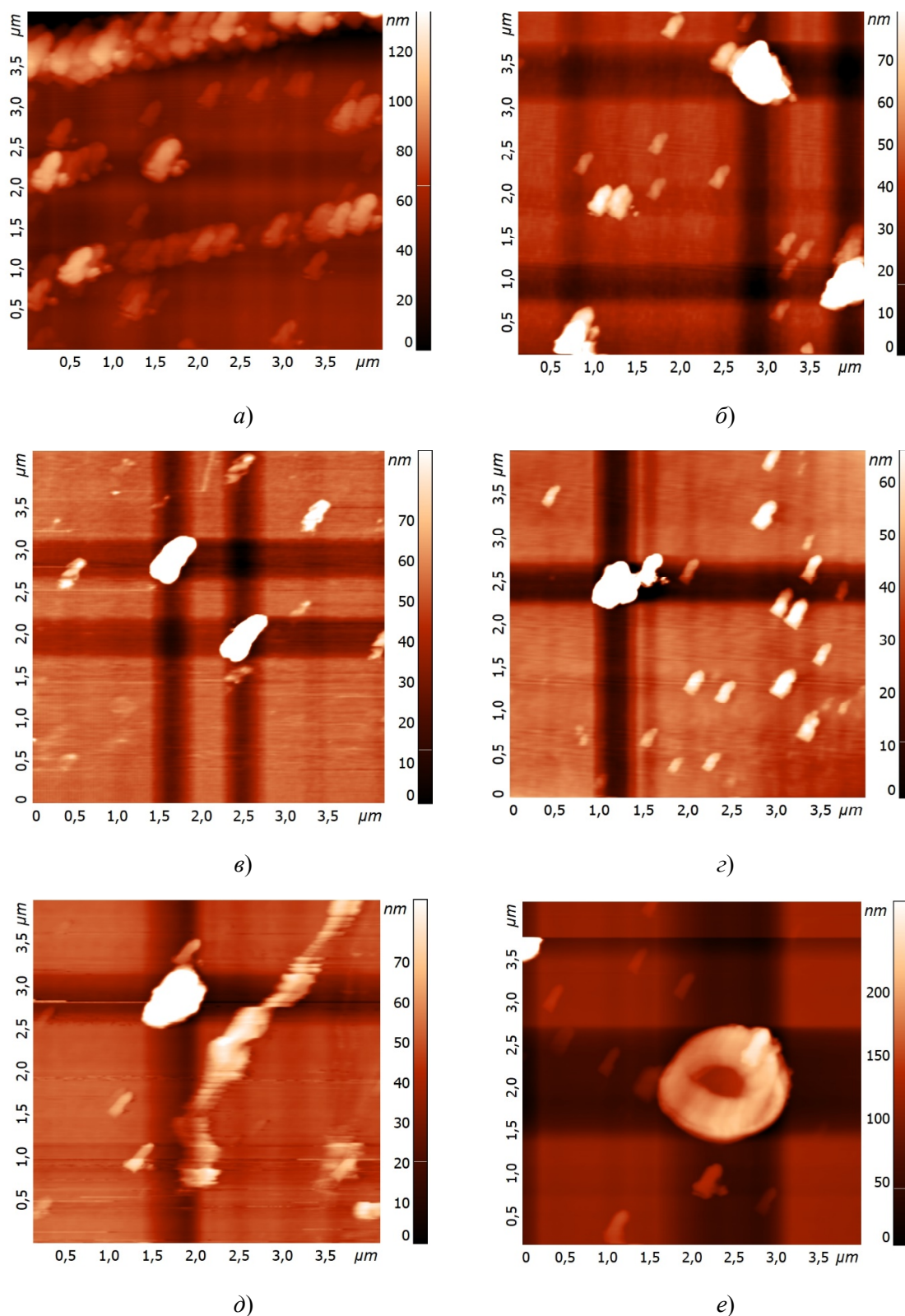


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности покрытий, осажденных при различном напряжении разряда:

a – 200 В; *б* – 250 В; *в* – 300 В; *г* – 350 В; *д* – 400 В; *е* – 450 В

При осаждении покрытия из импульсного сепарированного потока, формируемого при испарении катода дугой при напряжении 250 В, наблюдается уменьшение

размера зерна, одновременно с этим на поверхности присутствуют единичные структурные образования.

Морфология покрытий, осажденных при напряжении разряда 350 В из сепарированных потоков углеродной плазмы, дана на рис. 3, з. Согласно полученным данным, покрытие однородное, сплошное. Однако на поверхности присутствуют некоторые образования. Возможно при использовании сепаратора происходит фокусировка плазменного потока, что приводит к транспортировке некоторого количества макрочастиц, образованных в области катодного пятна, и размер этих частиц значительно меньше, чем полученных при других напряжениях разряда.

На поверхности покрытий, осажденных при напряжении разряда 450 В, присутствуют единичные включения размером около 2 мкм. При этом основная матрица характеризуется параметрами морфологии, характерными для аморфных углеродных покрытий, осаждаемых из импульсных потоков углеродной плазмы

Размер участка поверхности размером 1×1 мкм выбирался в области отсутствия микрочастиц и капель на поверхности покрытий с целью определения особенностей формирования поверхностной структуры покрытий при отсутствии капельной компоненты.

Результаты обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры морфологии покрытий

Напряжение разряда, В	Шероховатость Ra, нм	Размер зерна $D_{ср}$, нм
200	2,67	11,34
250	0,95	4,09
300	1,65	5,91
350	1,06	2,76
400	0,86	3,19
450	0,12	0,72

Анализ представленных в табл. 2 данных позволил сформулировать следующие выводы:

а) шероховатость покрытий, осажденных при низком напряжении разряда (200 В), максимальна, что связано с небольшой толщиной покрытий, а также незавершенностью поверхностной структуры, а именно – наличием островков, что формирует не сплошную структуру поверхности. Впоследствии при повышении напряжения разряда до 250 В и далее наблюдается монотонное снижение шероховатости с достижением минимального значений при напряжении разряда 450 В. Такое поведение, возможно, связано с особенностями формирования структуры покрытия, в частности, с увеличением температуры подложки, ростом напряжения разряда, а также со снижением количества микрочастиц в потоке плазмы при напряжении разряда 450 В;

б) размер зерна снижается с ростом напряжения разряда, что сказывается на увеличении твердости и плотности полученных покрытий.

Стоит отметить, что размер области сканирования 1×1 мкм характеризует поверхность покрытия без частиц, находящихся на поверхности, и определяет поверхностную морфологию углеродной матрицы. При размере скана 4×4 мкм на поверхности возможно наличие макрочастиц, приводящих к увеличению ее шероховатости (табл. 2).

На рис. 4 показаны зависимости твердости покрытий, осажденных при различном напряжении разряда, от глубины внедрения индентора.

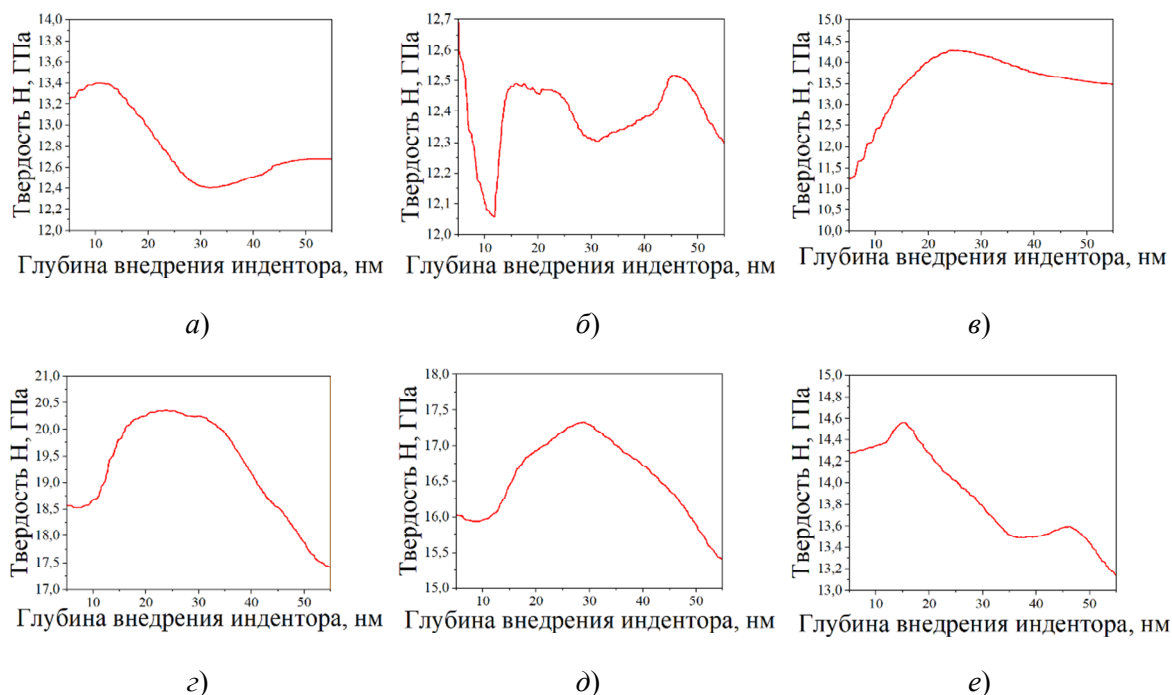


Рис. 4. Зависимость твердости от глубины индентирования для покрытий, осажденных при различном напряжении разряда: а – 200 В; б – 250 В; в – 300 В; г – 350 В; д – 400 В; е – 450 В

Для всех покрытий наблюдается снижение твердости с ростом глубины индентирования. Такое поведение может быть связано с различной толщиной покрытий. Известно, что напряжение разряда определяет количество испаренного материала катода и, следовательно, толщину покрытий. Также при малых напряжениях влияние подложки на механические свойства велико, что приводит к заниженным значениям твердости, определяющимся композиционной твердостью системы «покрытие – подложка». С ростом толщины покрытия наблюдается увеличение твердости и достижение максимальных значений 20,5 ГПа для покрытий, полученных при напряжении разряда 350 В. Известно [6–8], что твердость аморфных углеродных покрытий зависит только от отношения sp^2/sp^3 -атомов углерода, а также размера углеродного кластера.

Среднее значение твердости и модуля упругости покрытий, рассчитанное при глубине внедрения индентора 20 нм, приведено в табл. 3.

Таблица 3

Значение твердости

Напряжение, В	200	250	300	350	400	450
Твердость H , ГПа	12,62	12,2	14,1	20,5	17,2	13,7

Согласно табл. 3, твердость достигает максимальных значений при напряжении разряда 350 В, что определяется эффективностью работы сепаратора, в частности, снижением на поверхности количества частиц графита, и режимом испарения графитового катода, при котором формируется структура покрытий с высокой концентрацией sp^3 -углеродных связей, а также происходит формирование зерен с минимальным размером, что в комплексе приводит к увеличению твердости.

Графики зависимости коэффициента трения скольжения образцов, осажденных при разных напряжениях импульсного дугового разряда, от количества циклов даны на рис. 5.

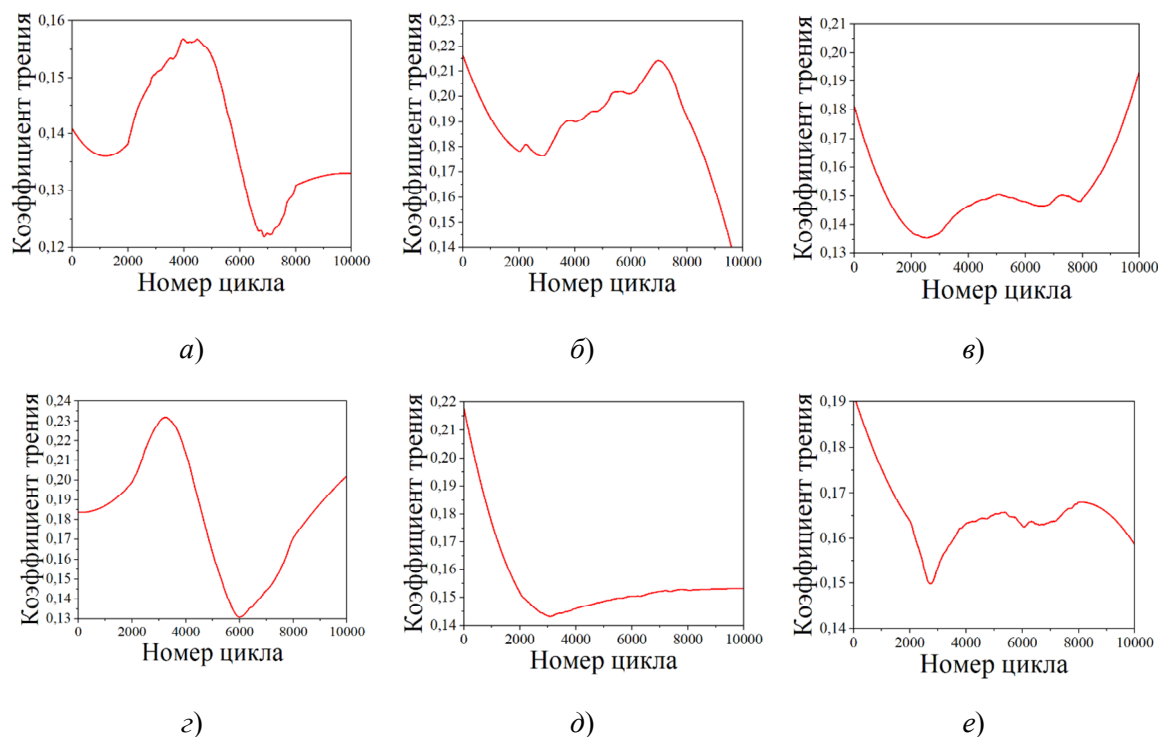


Рис. 5. Кинетические кривые трения покрытий, нанесенных при различном напряжении разряда:
а – 200 В; б – 250 В; в – 300 В; з – 350 В; д – 400 В; е – 450 В

Параметры трения, такие как коэффициент трения и объемный износ контртела, зависят от напряжения разряда, которое, как известно, определяет энергию ионов углерода, формирующих при осаждении структуру покрытия, включая отношение sp^2/sp^3 -гибридизированных атомов углерода, и шероховатость. В данном случае можно отметить, что при высоких напряжениях разряда в плазменном потоке наблюдается большое количество микрочастиц, которые осаждаются на поверхности, увеличивают шероховатость и определяют увеличение коэффициента объемного износа.

В табл. 4 представлены значения коэффициента трения в стабилизировавшемся режиме (после выхода на плато) и величина объемного износа контртела, определенная после прекращения триботехнических испытаний.

Таблица 4

Значения коэффициента трения и величины объемного износа

Напряжение, В	200	250	300	350	400	450
Коэффициент трения	0,15	0,19	0,15	0,14	0,15	0,17
Объемный износ контртела j , $10^{-16} \text{ м}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	3,87	0,37	0,44	0,21	0,46	1,94

Кинетические кривые трения показывают, что разрушение покрытия, осажденного при напряжении 200 В, происходит после достижения 5000 циклов трения, что указывает на недостаточно высокую износостойкость данного покрытия из-за его малой толщины. Разрушение покрытия, осажденного при напряжении 250 В, наблю-

дается при достижении 7500 циклов трения, при этом прослеживается монотонное увеличение коэффициента трения, указывающее на перестройку поверхностной морфологии, разрушение покрытия. Наличие в покрытии высокой концентрации графита приводит к низкому износу контртела, поскольку графит, попадая в зону трения, выступает как смазка, снижая разрушение поверхности контртела. Наряду с этим частичное удаление покрытия из зоны трения увеличивает шероховатость, что приводит к росту коэффициента трения.

Покрытия, осажденные при напряжениях 300–450 В, показали высокую износостойкость и не разрушились за все время испытаний.

Обратим внимание на то, что значения коэффициента трения показывают небольшой разброс в зависимости от напряжения разряда. Максимальные значения характерны для напряжения разряда 250 В, что связано с его структурой, а также поверхностной морфологией. Минимальный износ контртела показывают покрытия, осажденные при напряжении разряда, равном 350 В, что, согласно результатам исследования их структуры, выполненного методом спектроскопии КРС, определяется высоким содержанием атомов углерода в состоянии с sp^2 -гибридизацией связи, а также малой поверхностной шероховатостью.

Минимальный коэффициент трения наблюдается на образце, осажденном при напряжении 350 В. Это можно объяснить большим содержанием графитовой sp^2 -фазы. Максимальный коэффициент трения отмечается у образца, осажденного при напряжении разряда 250 В, вследствие высокой степени разупорядоченности, а также высокой поверхностной шероховатости, определяемой расположенными на поверхности покрытия частицами, которые работают как абразив, а также увеличивают площадь фактического контакта.

Заключение

Углеродные покрытия осаждены из сепарированных импульсных потоков углеродной плазмы, формируемой в результате испарения графитового катода электрическим разрядом. Методом спектроскопии КР исследовано изменение структуры и морфологии покрытий при различном напряжении разряда. Установлено немонотонное влияние напряжения разряда на формирование структуры покрытий. Показано, что оптимальными значениями напряжения разряда, согласно спектроскопии КР, являются 250 и 450 В. Методом АСМ установлено изменение поверхностной шероховатости и размера зерен от напряжения разряда. Показано снижение шероховатости покрытий при превышении напряжения разряда от 250 В, что связано с особенностями генерации импульсных плазменных потоков.

Триботехнические испытания показали, что для покрытий, осажденных при напряжении разряда 350 В, наблюдается минимальный объемный износ контртела, при этом покрытие имеет высокую износостойкость. Для покрытий, осажденных при напряжениях разряда 200 и 450 В, установлены высокие значения коэффициента объемного износа контртела. При напряжениях 250, 300 и 400 В отмечается низкий относительно других образцов объемный износ контртела.

При увеличении напряжения импульсного разряда от 200 до 250 В установлен рост коэффициента трения. На основе этого можно предположить, что в структуре покрытия увеличивается доля sp^3 -фазы, так как она характеризуется сильными межатомными связями между слоями, что и обуславливает увеличение коэффициента трения. Твердость покрытия с увеличением напряжения импульсного дугового разряда от 250 до 350 В также увеличивается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (номер государственной регистрации 20212075).

Литература

1. Siemroth, P. High current arc – a new source for high rate deposition / P. Siemroth, Th. Schulke, B. Schultrich // Proc. of the joint 4th Int. Symp. on TATF'94 and 11th Conf. on HVITF'94, Dresden, 7–11 March, 1994 / et. by G. Hecht, F. Richter, J. Hahn. – Dresden, 1994. – P. 231–234.
2. Стрельницкий, В. Е. Процессы синтеза и физические свойства высокотвердых углеродных покрытий : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.07 / В. Е. Стрельницкий. – Харьков, 2003. – 347 с.
3. Tochitsky, E. J. Structure and properties of carbon films prepared by pulsed vacuum arc deposition / E. J. Tochitsky // Surface and Coating Technology. – 1991. – Vol. 47. – P. 292–298.
4. Ferrari, A. C. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon / A. C. Ferrari, J. Robertson // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61 (20). – P. 14095–14107. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.14095>
5. Effect of annealing on structure and biomedical properties of amorphous hydrogenated carbon films / P. Yang [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 186. – P. 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.016>
6. Ferrari, A. C. Diamond-like carbon for magnetic storage disks / A. C. Ferrari // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 180–181. – P. 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10>
7. Sp³ content in ta-C films vs pulse bias width to the substrate: A correlative structural analysis / Md. Anisur Rahman [et al.] // Diamond Relat. Mater. – 2009. – Vol. 18. – P. 1343–1347. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.07.009>
8. Schultrich, B. Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films I: Basics, Structure and Preparation / B. Schultrich. – Berlin : Springer-Verlag ; Heidelberg & Go., 2018. – 752 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55927-7>

References

1. Siemroth P., Schulke Th., Schultrich B. High current arc – a new source for high rate deposition. *Proc. Of the joint 4th Int. Symp. On TATF'94 and 11th Conf. on HVITF'94*. Dresden, 1994, pp. 231–234.
2. Strel'nickij V. E. *Synthesis processes and physical properties of high-solid carbon coatings*. Kharkov, 2003. 347 p. (in Russian).
3. Tochitsky E. J. Struktura i svoystva uglirodnykh plenok, poluchennykh impul'snym vakuumno-dugovym osazhdeniyem. *Surface and Coating Technology*, 1991, vol. 47, pp. 292–298.
4. Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 2000, vol. 61 (20), pp. 14095–14107. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.14095>
5. Yang P., Chen J. Y., Leng Y. X., Sun H., Huang N., Chu P. K. Effect of annealing on structure and biomedical properties of amorphous hydrogenated carbon films. *Surface and Coating Technology*, 2004, vol. 186, pp. 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.016>
6. Ferrari A. C. Diamond-like carbon for magnetic storage disks. *Surface and Coating Technology*, 2004, vol. 180–181, pp. 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10>

7. Anisur Rahman Md., Maguire P., Roy S. S., McCann R., McKavanagh F., McLaughlin J. A. Sp^3 content in ta-C films vs pulse bias width to the substrate. *Diamond and Related Materials*, 2009, vol. 18, pp. 1343–1347. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.07.009>
8. Schultrich B. Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films I. Berlin, Springer-Verlag GmbH, 2018. 752 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55927-7>

Поступила 11.11.2023