

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПОДВЕРГНУТОМ ИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОДСЛОЕ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ И СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

А.С. Руденков¹, Джанг Сянь Хун², М.А. Ярмоленко¹, Д.Г. Пилипцов¹

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Нанкинский университет науки и технологии

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON COATINGS FORMED ON AN ION-BASED ETHYL CELLULOSE AND SULFURIC ACID UNDERLAYER

A.S. Rudenkov¹, Jiang Xiahong², M.A. Yarmolenko¹, D.G. Piliptsov¹

¹Francisk Skorina Gomel State University

²Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Установлено, что обработка ионами азота с энергией до 0,3 кэВ подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты приводит к увеличению субшероховатости и уменьшению соотношения sp^3/sp^2 -гибридизированных атомов углерода у формируемых на его поверхности углеродных покрытий. Указанные структурные изменения приводят к уменьшению твердости покрытий в 1,3–1,6 раз, а коэффициента объемного изнашивания контртела в 7–12 раз в зависимости от длительности ионной обработки подслоя. При этом для покрытий с подслоем, обработанным ионами азота в течение 4 минут, характерно наличие локальных участков со значениями твердости до 22,7 ГПа и высокого среднего значения модуля Юнга – 699,3 ГПа, что, согласно данным КР-спектроскопии, может быть обусловлено наличием фуллереноподобных углеродных наноструктур либо их фрагментов.

Ключевые слова: углеродные покрытия, азот, твердость, модуль упругости, коэффициент трения, наноструктуры.

Для цитирования: Структура и механические свойства углеродных покрытий, сформированных на подвергнутом ионной обработке подслое на основе этилцеллюлозы и серной кислоты / А.С. Руденков, Джанг Сянь Хун, М.А. Ярмоленко, Д.Г. Пилипцов // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 1 (66). – С. 25–31. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_1_66_25. – EDN: VIYVMP

Abstract. It was found that irradiating a sublayer based on ethyl cellulose and sulfuric acid with nitrogen ions with energies up to 0.3 keV increases subroughness and reduces the ratio of sp^3/sp^2 -hybridized carbon atoms in the carbon coatings formed on its surface. These structural changes lead to a 1.3–1.6 fold decrease in coating hardness and a 7–12-fold decrease in the volumetric wear coefficient of the counterface, depending on the duration of ion irradiation of the sublayer. Furthermore, coatings with a sublayer treated with nitrogen ions for 4 minutes are characterized by the presence of localized areas with hardness values up to 22.7 GPa and a high average Young's modulus of 699.3 GPa. According to Raman spectroscopy data, this may be due to the presence of fullerene-like carbon nanostructures or their fragments.

Keywords: carbon coatings, nitrogen, hardness, elastic modulus, friction coefficient, nanostructure.

For citation: Structure and mechanical properties of carbon coatings formed on an ion-based ethyl cellulose and sulfuric acid underlayer / A.S. Rudenkov, Jiang Xiahong, M.A. Yarmolenko, D.G. Piliptsov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 1 (66). – P. 25–31. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_1_66_25 (in Russian). – EDN: VIYVMP

Введение

В настоящее время ионно-плазменная обработка широко применяется для модификации углеродных материалов, таких как графен [1], углеродные нанотрубки [2] и углеродные пленки [3], [4] с целью управления их структурой и свойствами. В качестве прекурсора для синтеза углеродных наноструктур в результате пиролиза, ионно-плазменного воздействия, химической обработки в настоящее время широко используют этилцеллюлозу [5]. Также необходимо отметить, что в качестве катализатора при карбонизации

этилцеллюлозы применяются серосодержащие соединения [6]. Использование ионно-плазменной и химической обработки является перспективным технологическим приемом формирования углеродных покрытий, армированных углеродными наноструктурами, из органических и неорганических прекурсоров [7], [8].

При ионно-плазменной обработке осаждаемых покрытий наблюдается рост соотношения sp^3/sp^2 -гибридизированных атомов за счет имплантации атомов углерода в приповерхностном слое и увеличении его плотности. В [9] показано,

что ионно-плазменное травление осаждаемых углеродных покрытий приводит к увеличению их твердости с 32 ГПа до 46,3 ГПа за счет увеличения доли sp^3 -связей. Установлено, что ионное азотирование приводит к увеличению твердости углеродных слоев, в первую очередь, за счет образования N-C sp^3 связей, но с одновременным увеличением содержания sp^2 -гибридизированных атомов [3].

Таким образом, варьируя состав формируемых подслоев, ионно-плазменной обработкой можно управлять фазовым составом, а, следовательно, и свойствами углеродных покрытий. Однако из-за различий в методах формирования или используемом оборудовании влияние ионно-плазменной обработки на структуру и свойства углеродных слоев изучено недостаточно.

Целью настоящей работы является определение влияния обработанного ионами азота подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты подслоя на морфологию, фазовый состав и механические свойства углеродных покрытий.

1 Методика эксперимента

Углеродные покрытия на подслое на основе этилцеллюлозы и серной кислоты, подвергнутом ионной обработке, были получены трехстадийным методом. На первой стадии слой серной кислоты был сформирован путем электронно-лучевого диспергирования (энергия электронов (0,8–1,6) кэВ, плотность тока (10–30) мА/см²), слой этилцеллюлозы был осажден при помощи лазерного диспергирования исходной мишени (длина волны 532 нм, энергия в импульсе накачки 43 мДж, энергия в импульсе 450 мДж, длительность импульса 6 нс). Полученные слои подвергались термообработке при температуре 120° С на воздухе в течение 30 минут. На второй стадии полученные покрытия были подвергнуты обработке ионами азота с энергией до 0,3 кэВ в течении 4 минут и 8 минут (остаточное давление – 0,04 Па, напряжение анода – 100 В, ток анода – 2 А, ток накала – 6 А). На третьей стадии из плазмы импульсного катодно-дугового разряда на осажденные подслои были осаждены углеродные покрытия (3000 импульсов, частота 5 Гц, напряжение 350 В).

Таблица 2.1 – Влияние ионной обработки подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты на морфологию H₂SO₄ / ЭЦ / С покрытий

Покрытие	Длительность ионной обработки, мин	Средняя высота, нм	Rms, нм	Плотность зерен, шт.	Средний диаметр зерен, нм
H ₂ SO ₄ / ЭЦ / С	–	35,5	6,2	262	94
	4	144,3	32,0	34	330
	8	142,2	39,0	20	540

Статистическая обработка результатов атомно-силовой микроскопии (Solver Pro, NT-MDT, Россия), полученных в полуконтактном режиме на поле сканирования размером 4x4 мкм, используемые для анализа морфологии покрытий, осуществлялась при помощи программы Gwyddion. В качестве основных параметров для сравнительного анализа были выбраны: средняя высота и продольные размеры (радиус, диаметр) отдельных структурных образований (далее – зерен), их количество, среднеквадратичная шероховатость Rms.

Анализ химических связей и состава покрытий осуществлялся средствами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) при помощи спектрометра РНИ Quanterra (Япония).

Фазовый состав и структурная упорядоченность углеродных покрытий были установлены средствами спектроскопии комбинационного рассеяния с использованием спектрометра Senterra (Bruker, Германия). Длина волны возбуждающего излучения – 532 нм, мощность – 5 мВт.

Твердость *H* и модуль Юнга *E* углеродных покрытий измерялись посредством нанотвердомера НаноСкан 4D (ТИСНУМ, Россия), оснащенного индентором Берковича.

Коэффициент трения и коэффициент объемного изнашивания контртела *j* определялись в ходе триботехнические испытания, проводимых по схеме «сфера – плоскость» с нагрузкой 0,392 Н и средней скорости перемещения 0,0135 м/с, индентор – стальной шарик с радиусом 5 мм.

2 Результаты и их обсуждение

Установлено, что обработка подслоя на основе целлюлозы и серной кислоты ионами азота оказывает существенное влияние на процессы структурообразования углеродных покрытий, формируемых на его поверхности (рисунок 2.1).

Ионная обработка подслоя приводит к увеличению средней высоты отдельных структурных образований углеродных покрытий в 4 раза, их среднего диаметра в 3–5 раз, субшероховатости в 5–6 раз (таблица 2.1). Кроме того, с увеличением времени ионной обработки с 4 минут до 8 минут средняя высота зерен несущественно уменьшается, в то время как средний диаметр отдельных структурных образований увеличивается в 1,6 раз, а субшероховатость – в 1,2 раза.

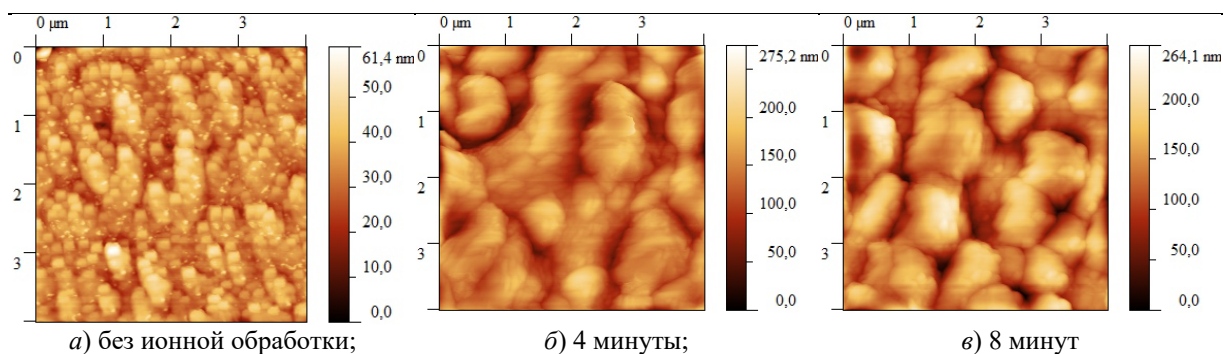


Рисунок 2.1 – АСМ изображения углеродных покрытий, сформированных на подвергнутом в течение различного времени ионной обработке подслое на основе этилцеллюлозы и серной кислоты

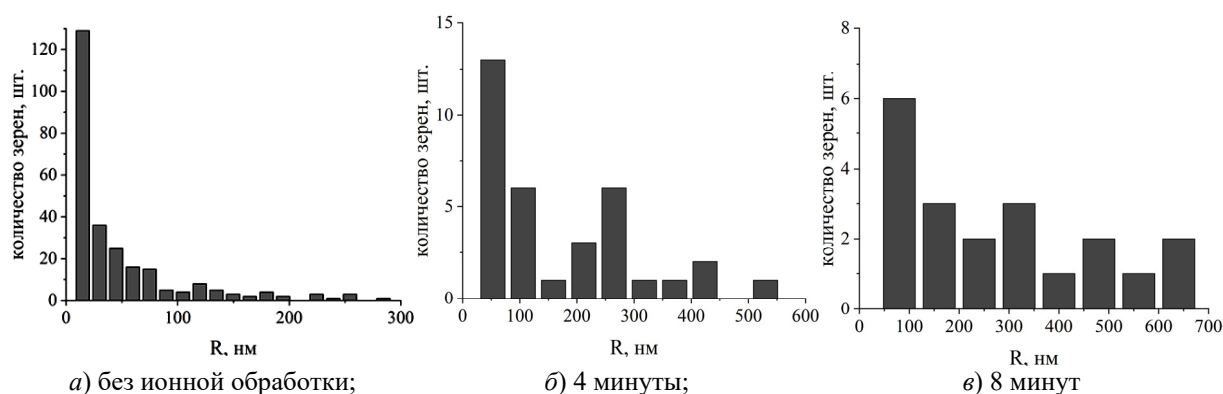


Рисунок 2.1 – Распределение зерен углеродных покрытий, сформированных на подвергнутом в течение различного времени ионной обработке подслое на основе этилцеллюлозы и серной кислоты

Данный факт объясняется неоднородностью фазового состава подслоя, его преимущественным травлением вдоль определенных кристаллографических направлений, а также возможной аморфизацией нанокристаллов графита и фазовым переходом $sp^3 \rightarrow sp^2$ вследствие нагрева при ионной обработке.

Установлено, что покрытия, сформированные без обработки ионами азота, характеризуются более высокодисперсной структурой (рисунок 2.2). Около 30% отмаркированных зерен обладают диаметром около 30 нм, в то время как в случае углеродных покрытий, полученных при ионной обработке подслоя в течение 8 минут, 30% отмаркированных зерен имеют размер около 160 нм, а 25% – свыше 800 нм.

При этом необходимо отметить, что распределение зерен по размерам в случае углеродных покрытий, полученных без ионной обработки, является унимодальным. В то время как покрытия, полученные с применением ионной обработки, характеризуются мультимодальным распределением зерен по размеру.

Спектр комбинационного рассеяния углеродных покрытий, сформированных на подслое на основе серной кислоты и целлюлозы, полученном путем лазерного диспергирования исходных компонентов с последующей обработкой ионами азота, был разложен на следующие

составляющие: Т-пик около $1180 \div 1230 \text{ см}^{-1}$, обусловленный, как правило, наличием sp^3 -кластеров с размером менее 5 нм; D-пик около $1350 \div 1450 \text{ см}^{-1}$, определяемый радиальными колебаниями шестиатомных колец с сопряженными sp^2 -связями и наличием дефектов (отсутствующий в спектрах высокоупорядоченных структур); G-пик вблизи 1550 см^{-1} , вызванный продольными колебаниями sp^2 -связей в ароматических и цепочечных молекулах углеродных материалов; D'-пик вблизи $1600 \div 1620 \text{ см}^{-1}$, формируемый наличием фрагментов графеновых плоскостей [10], [11]. При этом согласно [11] пик вблизи 1228 см^{-1} соответствует E_1 моде фуллере-на C_{70} . Одновременное наличие Т- и D'-пика, согласно [12], может указывать на наличие sp^3 -кластеров с размером менее 5 нм.

Показано, что ионная обработка подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты оказывает существенное влияние на спектры комбинационного рассеяния (а, следовательно, на процессы структурообразования), формируемые на его поверхности из плазмы импульсного катодно-дугового разряда углеродных слоев (таблица 2.2). Соотношение I_D / I_G увеличивается с 0,16 до 0,77 при увеличении длительности обработки подслоя до 8 минут, что может быть обусловлено процессами аморфизации sp^3 -кластеров, фазовой трансформацией $sp^3 \rightarrow sp^2$ и возникновением

радиационных дефектов вследствие бомбардировки ионами азота до 0,3 кэВ.

Известно, что соотношение I_D / I_G прямо пропорционально зависит от размера sp^2 -кластеров при его значении менее 2 нм и обратно пропорционально при больших размерах.

Согласно [13], [14] смещение D-пика в область более низких волновых чисел, а G-пика, наоборот, в область более высоких волновых чисел указывает на графитизацию углеродной матрицы и агломерацию sp^2 -кластеров, что подтверждается вышеприведенными данными атомно-силовой микроскопии.

Увеличение ширины G-пика $H_2SO_4 / ЭЦ / C$ покрытий вследствие ионной обработки подслоя обусловлено увеличением степени разупорядоченности sp^2 -кластеров и может косвенно свидетельствовать об их аморфизации.

Установлено, что ионная обработка подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты приводит к смещению T-пика с 1182 см^{-1} до 1234 см^{-1} в случае длительности обработки в течение 4 минут и до 1214 см^{-1} при длительности 8 минут.

Такие изменения могут быть вызваны как изменением размеров sp^3 -кластеров, так и образованием вследствие ионной обработки фрагментов монослоев углерода, характерных для фуллеренов.

Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (таблица 2.3) согласуются с результатами КР-спектроскопии, указывающими на увеличение содержания sp^2 -связей при обработке подслоя на основе ЭЦ и H_2SO_4 ионами азота с энергией 0,3 кэВ.

$C1s$ спектр РФЭС, расположенный около 280÷290 эВ был разложен при помощи функции Гаусса следующим образом (рисунок 2.4): Csp^2 – пик с энергией связи ~ 284,6 эВ; Csp^3 – пик с энергией связи ~ 285,4 эВ [15]; Csp^2-N с энергией связи 285,9 эВ [16]. Ввиду близкого взаимного расположения и малой интенсивности пик $C = S$ пик с энергией связи ~ 287,2 эВ [17] и $C - O$ пик с энергией связи ~ 286,5 эВ [18] были объединены. Кроме того, необходимо учитывать, что пик около 287÷287,3 эВ указывает на присутствие Csp^3-N связей [16].

Таблица 2.2 – Влияние длительности ионной обработки подслоя на основе ЭЦ + H_2SO_4 на параметры КР-спектров $H_2SO_4 / ЭЦ / C$ покрытий

Покрытие	Длительность ионной обработки, мин	D-пик		G-пик		I_D / I_G
		Положение, см^{-1}	Ширина, см^{-1}	Положение, см^{-1}	Ширина, см^{-1}	
$H_2SO_4 / ЭЦ / C$	–	1414	62	1530	99	0,16
	4	1424	201	1551	130	0,62
	8	1390	181	1544	116	0,77

Таблица 2.3 – Влияние длительности ионной обработки подслоя на основе ЭЦ + H_2SO_4 на $C1s$ спектр РФЭС $H_2SO_4 / ЭЦ / C$ покрытий

Покрытие	Длительность ионной обработки, мин	Тип связи	Пик, эВ ($\pm 0,3$ эВ)	Ширина, эВ	Доля площади, %	Csp^3 / Csp^2
$H_2SO_4 / ЭЦ / C$	–	Csp^2	284,4	1,1	39,9	1,44
		Csp^3	285,1	1,1	57,5	
		$C - O$	286,3	0,7	2,6	
	4	Csp^2	284,6	1,1	54,5	0,48
		Csp^3	285,4	1,1	26,3	
		Csp^2-N	285,9	1,1	18,0	
		$C - O / C = S$	287,0	0,5	1,2	
	8	Csp^2	284,7	1,1	52,3	0,57
		Csp^3	285,4	1,3	30,0	
Csp^2-N		285,9	1,1	16,4		
$C - O / C = S$		286,9	0,7	1,3		

Таблица 2.4 – Влияние длительности ионной обработки подслоя на основе ЭЦ + H_2SO_4 на механические свойства $H_2SO_4 / ЭЦ / C$ покрытий

Покрытие	Длительность ионной обработки, мин	H , ГПа	E , ГПа	H / E	H^3 / E^2 , ГПа	Коэффициент трения	$j \cdot 10^{-17}$, $\text{м}^3 / (\text{Н} \cdot \text{м})$
$H_2SO_4 / ЭЦ / C$	–	7,6	193,8	0,049	0,0117	0,66	1330,9
	4	5,9	699,3	0,008	0,0004	0,68	109,7
	8	4,8	84,4	0,057	0,0155	0,70	190,8

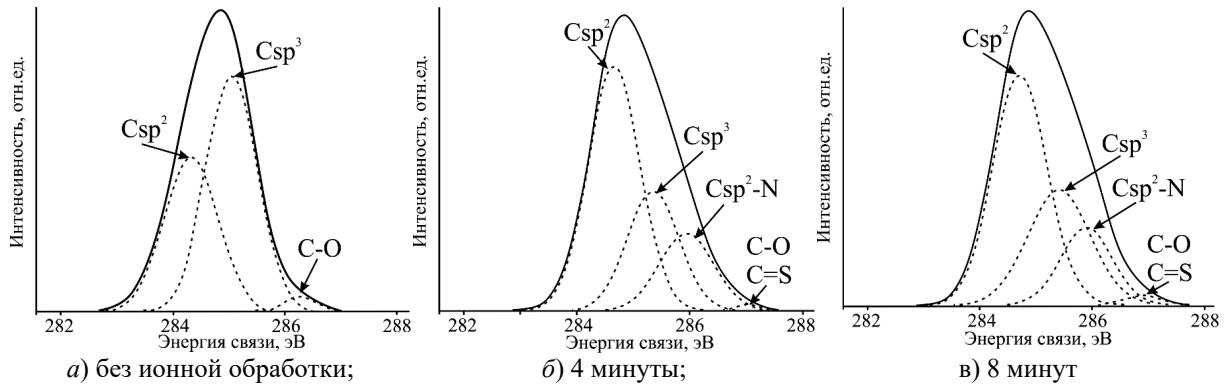


Рисунок 2.4 – C1s спектр РФЭС H₂SO₄/ЭЦ/С покрытий, осажденных на подслое на основе ЭЦ + H₂SO₄ с различной длительностью обработки ионами азота

Анализ N1s и S2p спектров провести не удалось, т. к. РФЭС чувствителен только к поверхностному слою (глубина выхода фотоэлектронов из образца составляет не более 5 нм) [19], а их интенсивность достаточно низкая из-за малой концентрации азота и серы в приповерхностных слоях – не более 0,9 ат. % и 0,8 ат. % соответственно.

Установлено, что соотношение Csp³ / Csp² покрытий, сформированных на подслое на основе этилцеллюлозы и серной кислоты, не подвергнутом ионной обработке, выше, чем у покрытий, полученных с использованием обработки ионами азота. Рост Csp² компоненты C1s пика вызван процессами фазовой трансформации sp³→sp² и образованием sp²-кластеров из-за нагрева подслоя вследствие бомбардировки ионами азота. При этом увеличение длительности ионной обработки подслоя с 4 до 8 минут приводит к незначительному уменьшению доли Csp², вероятно, вследствие травления.

Кроме того, установлен факт образования соединений Csp²-N. По всей видимости при нанесении углеродных слоев из плазмы импульсного катодно-дугового разряда после ионной обработки вследствие нагрева поверхности и дегазации, а также пористости формируемого покрытия, азот вступает во взаимодействие с осаждаемыми частицами углерода.

Изменения структуры и фазового состава H₂SO₄ / ЭЦ / С покрытий вследствие последующей обработки ионами азота с энергией 0,3 кэВ подслоя сказываются на их механических свойствах (таблица 2.4).

Установлено, что ионная обработка подслоя на основе ЭЦ и H₂SO₄ приводит к уменьшению твердости *H* покрытий H₂SO₄ / ЭЦ / С с 7,6 ГПа до 4,8 ГПа (рисунок 2.5). С увеличением длительности ионной обработки с 4 минут до 8 минут твердость уменьшается с 5,9 ГПа до 4,8 ГПа.

Данный факт обусловлен, по всей видимости, нагревом подслоя вследствие ионной обработки, вызывающей его аморфизацию, фазовую трансформацию sp³→sp², а также агломерацию и

увеличение размеров sp²-кластеров. Увеличение размеров sp²-кластеров, согласно закону Холла – Петча, также может приводить к снижению твердости покрытий [20].

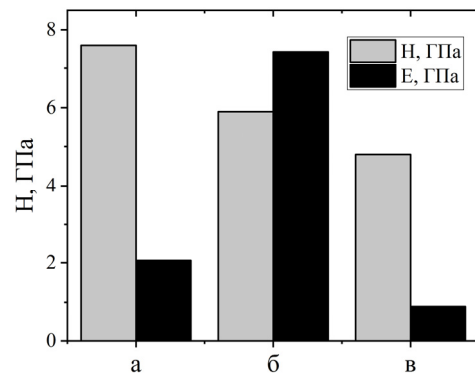


Рисунок 2.5 – Влияние длительности ионной обработки подслоя на основе ЭЦ + H₂SO₄ на твердость *H* и модуль Юнга *E* покрытий H₂SO₄ / ЭЦ / С: а) без ионной обработки; б) 4 минуты; в) 8 минут

Углеродные покрытия, сформированные на подслое на основе этилцеллюлозы и серной кислоты, который был подвержен ионной обработке в течение 4 минут, характеризуются неоднородным распределением значений твердости по поверхности (до 22,7 ГПа), что объясняется их неоднородным фазовым составом, а также наличием Csp²-N связей. Модуль Юнга вышеуказанных покрытий равняется 699,3 ГПа, что выше в 3,6 раза, чем у покрытий без ионной обработки, и выше в 8,3 раза, чем у покрытий, сформированных на подслое, обработанном в течение 8 минут. Такое высокое значение модуля упругости может быть обусловлено наличием углеродных наноструктур (согласно [21] модуль Юнга варьируется от 0,40 до 3,7 ТПа) или наличием нанокристаллических sp³-кластеров [22].

Снижение модуля Юнга H₂SO₄ / ЭЦ / С покрытий, сформированных на подслое, обработанном ионами азота в течение 8 минут,

обусловлено увеличением размеров sp^2 -кластеров, разрушением фрагментов наноструктур, аморфизацией и образованием радиационных дефектов.

Наименьшими значениями сопротивления упругой деформации H/E и сопротивления пластической деформации H^3/E^2 обладают покрытия, полученные на подслое этилцеллюлозы и серной кислоты, обработанном ионами азота в течение 4 минут, что может косвенно свидетельствовать об их низкой износостойкости [23] вследствие наименьшего значения соотношения sp^3/sp^2 из рассматриваемых образцов согласно результатам РФЭС (таблица 2.3). Наибольшей пластичностью из рассматриваемых образцов характеризуются $H_2SO_4/ЭЦ/С$ покрытия, сформированные на подслое, обработанном ионами азота в течение 8 минут, что может быть обусловлено увеличением размеров sp^2 -кластеров и аморфизацией покрытия.

Установлено, что ионная обработка подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты приводит к уменьшению значения коэффициента объемного изнашивания контртела j в 7–12 раз в зависимости от длительности ионной обработки. Данный факт объясняется нагревом подслоя в результате ионной обработки и, как следствие, увеличением содержания графита, выступающего в роли твердой смазки. Наименьшим значением коэффициента объемного изнашивания контртела j характеризуются покрытия с подслоем, обработанным в течении 4 минут, что может быть обусловлено наличием фрагментов наноструктур (например, фуллеренов), предотвращающих износ контртела. Рост коэффициента объемного изнашивания контртела с увеличением длительности ионной обработки с 4 минут до 8 минут может быть обусловлен увеличением соотношения sp^3/sp^2 с 0,48 до 0,57 и абразивным действием sp^3 -кластеров.

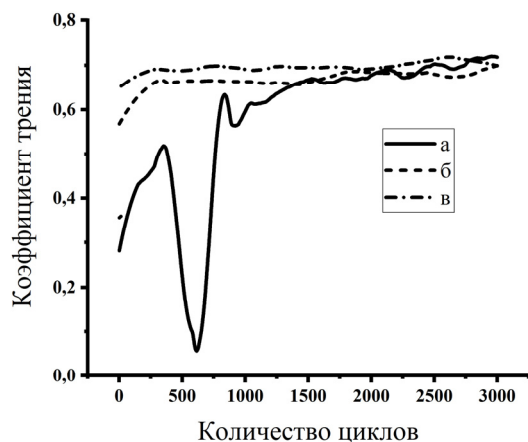


Рисунок 2.6 – Кинетические зависимости коэффициента трения углеродных покрытий на подслое на основе ЭЦ + H_2SO_4 с различной длительностью обработки ионами азота: а) без ионной обработки; б) 4 минуты; в) 8 минут

Показано, что ионная обработка подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты покрытий $H_2SO_4/ЭЦ/С$ приводит к незначительному увеличению коэффициента трения (рисунок 2.6).

При этом стадия приработки в случае покрытий с обработанным ионами азота подслоем гораздо короче, значение коэффициента трения более стабильно, что, вероятно, обусловлено увеличением содержания sp^2 -фазы (соотношение sp^3/sp^2 уменьшается с 1,44 до 0,48), выступающей в роли твердой смазки. С увеличением длительности ионной обработки с 4 минут до 8 минут коэффициент трения увеличивается с 0,68 до 0,70, что может объясняться увеличением шероховатости покрытий, размеров отдельных структурных образований и подтверждается данными атомно-силовой микроскопии (таблица 2.1).

Выводы

Установлено, что обработка ионами азота (с энергией не более 0,3 кэВ) подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты оказывает существенное влияние на процессы структурообразования и фазовый состав осаждаемых из плазмы импульсного катодного-дугового разряда углеродных слоев. Углеродные покрытия, сформированные на обработанном подслое, характеризуются более низкими значениями твердости и коэффициента объемного изнашивания контртела, но более высокими значениями коэффициента трения, чем в случае покрытий, полученных без применения ионной обработки, что объясняется различной скоростью травления вдоль определенных кристаллографических направлений, а также возможной аморфизацией нанокристаллов графита и фазовым переходом $sp^3 \rightarrow sp^2$ вследствие нагрева при ионной обработке. Высокое значение модуля Юнга, равное 699,3 ГПа, для покрытий, полученных при длительности обработки ионами подслоя 4 минуты, может быть обусловлено наличием углеродных наноструктур, однако данный факт требует проведения дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tailoring properties of reduced graphene oxide by oxygen plasma treatment / I. Kondratowicz [et al.] // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 440. – P. 651–659.
2. Fast functionalization of vertically aligned multiwalled carbon nanotubes using oxygen plasma / A.O. Lobo [et al.] // Materials Letters. – 2012. – Vol. 70. – P. 89–93.
3. Влияние ионного азотирования на фазовый состав, структуру и свойства углеродных покрытий / А.С. Руденков [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 1 (26). – С. 37–42.
4. Aizawa, T. Oxygen plasma etching of diamond-like carbon coated mold-die for micro-texturing /

- T. Aizawa, T. Fukudo // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 215. – P. 364–368.
5. Витязь, П.А. Наноматериаловедение: учеб. пособие для студентов вузов / П.А. Витязь, Н.А. Свидунович, Д.В. Куис. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.
6. *Fullerene-like CS_x: A first-principles study of synthetic growth* / C. Goyenola [et al.] // *Chemical Physics Letters*. – 2011. – Vol. 506. – P. 86–91.
7. *Влияние условий и режима формирования подслоя на основе этилцеллюлозы и серной кислоты на структуру углеродных покрытий* / А.С. Руденков, А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко, Д.Г. Пилипцов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2025. – № 2 (63). – С. 35–43.
8. *A comparison between ion irradiation assisted- and electron irradiation assisted-oxygen plasma treatment on modification of nanostructured carbon films* / M. Guo [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 466. – Article 129656.
9. *Dwivedi, N.* Role of ex-situ oxygen plasma treatments on the mechanical and optical properties of diamond-like carbon thin films / N. Dwivedi, S. Kumar, H.K. Malik // *Materials Chemistry and Physics*. – 2012. – Vol. 134. – P. 7–12.
10. *Ferrari, A.C.* Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon / A.C. Ferrari, J. Robertson // *Physical Review B*. – 2000. – Vol. 61. – P. 4095–4107.
11. *A concise review of the Raman spectra of carbon allotropes* / V. Thapliyal [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2022. – Vol. 127. – Article 109180.
12. *The Raman spectrum of nanocrystalline diamond* / S. Praver [et al.] // *Chemical Physics Letters*. – 2000. – Vol. 332. – P. 93–97.
13. *Однофононные рамановские спектры углерода в композитных пленках, полученных модифицированием аморфного гидрированного углерода медью и кобальтом* / Э.А. Сморгонская [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2003. – Т. 45. – С. 1579–1589.
14. *A phenomenological approach for the I_d/I_g ratio and sp³ fraction of magnetron sputtered a-C films* / S. Zhang [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 123. – P. 256–260.
15. *Chen, X.* A review on C1s XPS-spectra for some kinds of carbon materials / X. Chen, X. Wang, D. Fang // *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. – 2020. – Vol. 28. – P. 1048–1058.
16. *Effect of nitrogen doping on the microstructure and thermal stability of diamond-like carbon coatings containing silicon and oxygen* / J. Peng, Y. Xiao, M. Yang, J. Liao // *Surface & Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 421. – Article 127479.
17. *Reactive sputtering of CS_x thin solid films using CS₂ as precursor* / H. Hogberg [et al.] // *Vacuum*. – 2020. – Vol. 182. – Article 109775.
18. *XPS and XAS preliminary studies of diamond-like carbon films prepared by HiPIMS technique* / J. Lomon [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1144. – Article 012048.
19. *Юдин, А.Л.* Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия: учеб.-метод. пособие / А.Л. Юдин. – Кемерово, 2004. – 47 с.
20. *Камышанченко, Н.В.* Соотношение Холла-Петча при описании предела текучести и микротвёрдости технически чистого никеля, подвергнутого отжигу в диапазоне 700–1000°С / Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев, О.А. Печерина // *Научные ведомости*. – 2011. – № 23. – С. 201–207.
21. *Ebbesen, T.W.* Exceptionally high young's modulus observed for individual carbon nanotubes / T.W. Ebbesen, J.M. Gibson // *Nature*. – 1996. – Vol. 381. – P. 678–680.
22. *Tribological properties of nanocrystalline diamond films deposited by hot filament chemical vapor deposition* / N. Kumar [et al.] // *Aip Advances*. – 2012. – Vol. 2. – Article 032164.
23. *Leyland, A.* On the significance of the H/E ratio in wearcontrol: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behavior / A. Leyland, A. Matthews // *Wear*. – 2000. – Vol. 246. – P. 1–11.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР «Формирование наноконпозиционных углеродных покрытий в условиях ионного стимулирования», задание «Разработка принципов создания и исследование процессов и систем для формирования тонкопленочных покрытий и структур с улучшенными функциональными свойствами» ГПНИ Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма «Электрофизические и литейно-деформационные технологии создания и обработки материалов».

Поступила в редакцию 12.01.2026.

Информация об авторах

Руденков Александр Сергеевич – к.т.н., доцент
Цзян Сяо Хун – профессор
Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., профессор
Пилипцов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., доцент