

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА УПРОЧНЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ В КРИОГЕННОЙ СРЕДЕ

Н. М. Чекан¹, Е. В. Овчинников², В. М. Хвйсевич³, И. П. Акула⁴, А. И. Веремейчик⁵

¹ К. физ.-мат. н., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: pec@bas-net.by

² Д. т. н., доцент, доцент кафедры логистики и методов управления УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ovchin_1967@mail.ru

³ К. т. н., доцент, профессор кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisevich@bstu.by

⁴ К. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: pec@bas-net.by

⁵ К. физ.-мат. н., доцент, старший научный сотрудник испытательного центра УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

Реферат

Статья посвящена вопросу воздействия низких температур на нанокристаллические покрытия, сформированные на стальных субстратах. Применение алмазоподобных покрытий широко распространено в машиностроении в качестве антифрикционных, антиадгезионных слоев. Проведение дополнительной обработки при криогенных температурах должно улучшать эксплуатационные характеристики вакуумных покрытий. Исследованы морфология, физико-механические характеристики углеродных вакуумных покрытий, сформированных на стали Р6М5, подвергнутых обработке при криогенных температурах. Изучены структурные превращения, происходящие в вакуумных покрытиях, сформированных на стальных подложках с последующей обработкой при пониженных температурах. Показано изменение физико-механических характеристик алмазоподобных покрытий, сформированных на стальных субстратах, подвергнутых обработке в криогенной жидкости.

Ключевые слова: нанокристаллические покрытия, вакуумные покрытия, криогенные температуры, алмазоподобные покрытия.

INVESTIGATION OF THE MORPHOLOGY AND PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DIAMOND-LIKE COATINGS FORMED ON HARDENED METAL SURFACES WITH SUBSEQUENT PROCESSING IN A CRYOGENIC ENVIRONMENT

N. M. Chekan, Y. V. Auchynnikau, V. M. Khvisevich, I. P. Akula, A. I. Veremeichik

Abstract

The article is devoted to the effect of low temperatures on nanocarbon coatings formed on steel substrates. The use of diamond-like coatings is widespread in mechanical engineering as anti-friction, anti-adhesive layers. Additional processing at cryogenic temperatures should improve the performance of vacuum coatings. The morphology and physical and mechanical characteristics of carbon vacuum coatings formed on P6M5 steel and processed at cryogenic temperatures are studied. Structural transformations occurring in vacuum coatings formed on steel substrates with subsequent processing at low temperatures are studied. Changes in the physical and mechanical characteristics of diamond-like coatings formed on steel substrates treated in a cryogenic liquid are shown.

Keywords: nanocarbon coatings, vacuum coatings, cryogenic temperatures, diamond-like coatings.

Введение

Применение нанокристаллических алмазоподобных покрытий (АПП) для упрочнения поверхностных слоев различных материалов является одним из широко используемых методов в инженерии поверхности. Это связано с их уникальными физико-механическими свойствами. Алмазоподобные пленки, получаемые плазмохимическими методами, широко используются в качестве просветляющих защитных покрытий элементов оптических устройств, антифрикционных покрытий инструмента различного назначения, защитных слоев на изделиях медицинского назначения, что обусловлено их низкой активностью при взаимодействии с окружающей средой. Покрытия АПП обладают прозрачностью в видимом диапазоне длин волн. Широкое применение алмазоподобных покрытий нашло при создании рабочих слоев для хранения информации при использовании для магнитных дисков [1–7]. В последнее время особое внимание уделяется исследованиям по изучению структуры и свойств поликристаллических алмазоподобных покрытий на металлических подложках, обладающих повышенной твердостью [7–10]. Некоторые их физические свойства, такие как теплопроводность, твердость, коррозионная стойкость, прозрачность, близки к свойствам природного алмаза. Варьируя технологические режимы получения АПП, можно изменять концентрацию примесных атомов и в широких пределах регулировать ширину запрещенной зоны, что в конечном случае влияет на проводимость данных покрытий.

Нанокристаллические покрытия поликристаллического алмаза (НАПП) нашли широкое использование из-за возможных различных технологических применений [1]. Такие пленки могут быть использованы для трибологических покрытий и в качестве твердых, износостойких биосовместимых материалов [2] с низким коэффициентом трения. Основным преимуществом по сравнению с поликристаллическими алмазными пленками является, в частности, их относительно низкая шероховатость поверхности. Однако, подобно микрокристаллическому алмазу, граничные свойства зерна, размер зерна и, следовательно, концентрация sp²/sp³ в пленках НАПП могут быть существенно изменены. В настоящее время технология формирования пленок НАПП становится тривиальной задачей. Как правило, существует два основных способа приготовления пленок НАПП: с использованием химических реакций, протекающих в вакууме с использованием аргона [3–6], или с использованием химических реакций, протекающих в вакууме на основе водорода [7, 8]. В дальнейшем применялись и другие технологические приемы для получения покрытий НАПП с добавлением N₂ или увеличением концентрации в вакуумной камере CH₄. Проведенные исследования показали перспективность применения данных технологических подходов. В ряде работ показана возможность формирования покрытий НАПП на твердых субстратах при температурах разогрева подложки менее 400 °С. Это дает возможность для многочисленных технических применений данных покрытий, где используются чувствительные к температуре подложки. Необходимо отметить,

что в настоящее время недостаточно информации о физико-механических, химических свойствах покрытий, формируемых при низких температурах, в частности менее 600 °С. Однако хорошо известно, что покрытия НАПП, полученные плазмохимическими методами с использованием аргона, являются «черными» из-за высокой концентрации атомов с sp^2 -гибридизации.

Таким образом, существуют различные способы увеличения прочностных характеристик алмазоподобных покрытий. Одним из направлений формирования сверхтвердых нанокomпозиционных покрытий на основе алмаза является создание их на упрочненных металлических поверхностях с последующим дисперсионным упрочнением в криогенной жидкости.

Целью работы является исследование морфологии и физико-механических характеристик алмазоподобных покрытий, сформированных на упрочненных стальных субстратах с последующей обработкой в криогенной среде.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследований были выбраны алмазоподобные покрытия, формируемые в вакууме по плазмохимическим технологиям. Нанокomпозиционные покрытия формировали методом катодно-дугового осаждения на вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной источником стационарной металлической плазмы с катодом из циркония, и ионным источником с кольцевым анодом «Радикал», через который подается газовая смесь $N_2+C_2H_2$, необходимая для формирования алмазоподобных покрытий. Покрытия толщиной около 1,5–3 мкм были получены на полированных подложках (11 класс чистоты), изготовленных из стали Р6М5. Исследование морфологии и структуры нанокomпозиционных покрытий проводили методами оптической, атомно-силовой и растровой электронной микроскопии. Время обработки исследуемых образцов в криогенной жидкости составляло от 30 минут до 24 часов. Особенности строения граничных слоев в стальных субстратах и композиционных покрытиях функционального назначения исследовали с привлечением оптической микроскопии. Для измерения значений микротвердости стальных субстратов и покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер НВММТ-Х7. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка с, полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой. Топографию

защитных слоев определяли на профилометре «Surftest SJ-210».

Результаты исследований

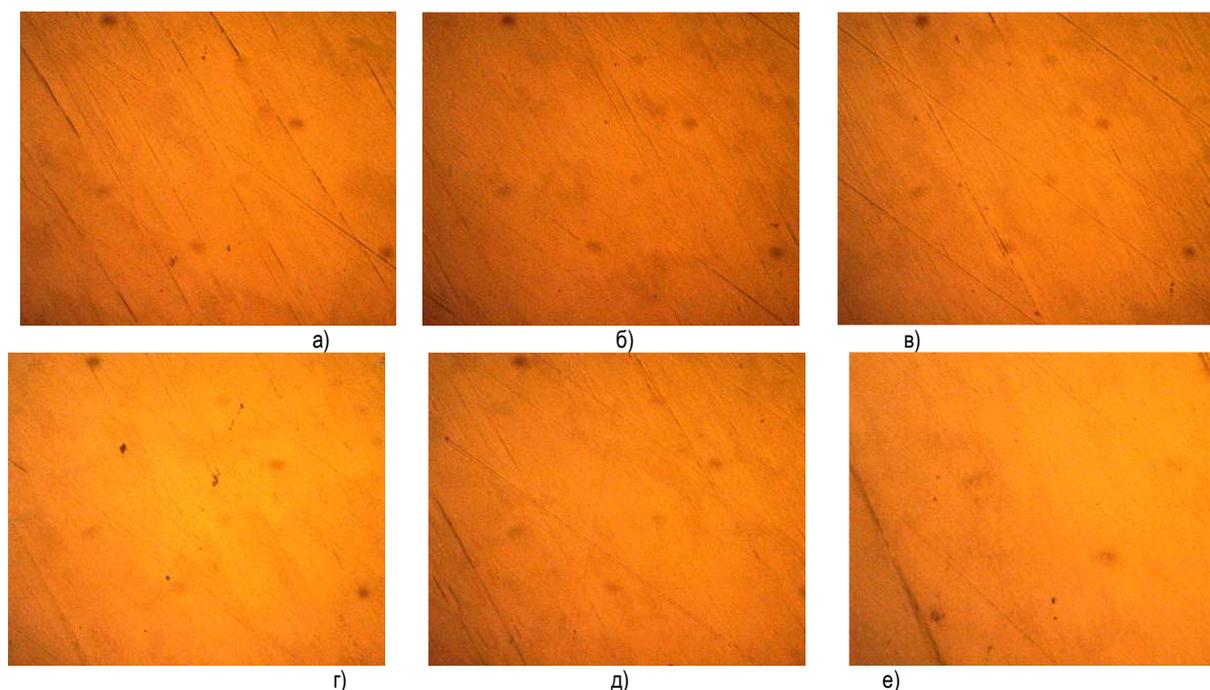
На рисунке 1 представлены изображения поверхности стальных образцов после криогенной обработки, полученные методом оптической микроскопии.

Исходя из полученных данных видно, что проведение предварительной обработки в криогенной жидкости закаленной стали Р6М5 приводит к некоторому сглаживанию исходного рельефа. Данный эффект подтверждается результатами исследования шероховатости поверхности стальных субстратов, полученных с применением программного комплекса Autoscan (рисунок 2). Возможно, что при воздействии низких температур происходит дисперсионное упрочнение поверхностных слоев, сопровождающееся увеличением прочностных характеристик и измельчением структурных составляющих.

Криогенная обработка алмазоподобных покрытий приводит к изменению морфологии углеродных слоев за счет увеличения концентрации соединений с sp^3 -гибридизацией.

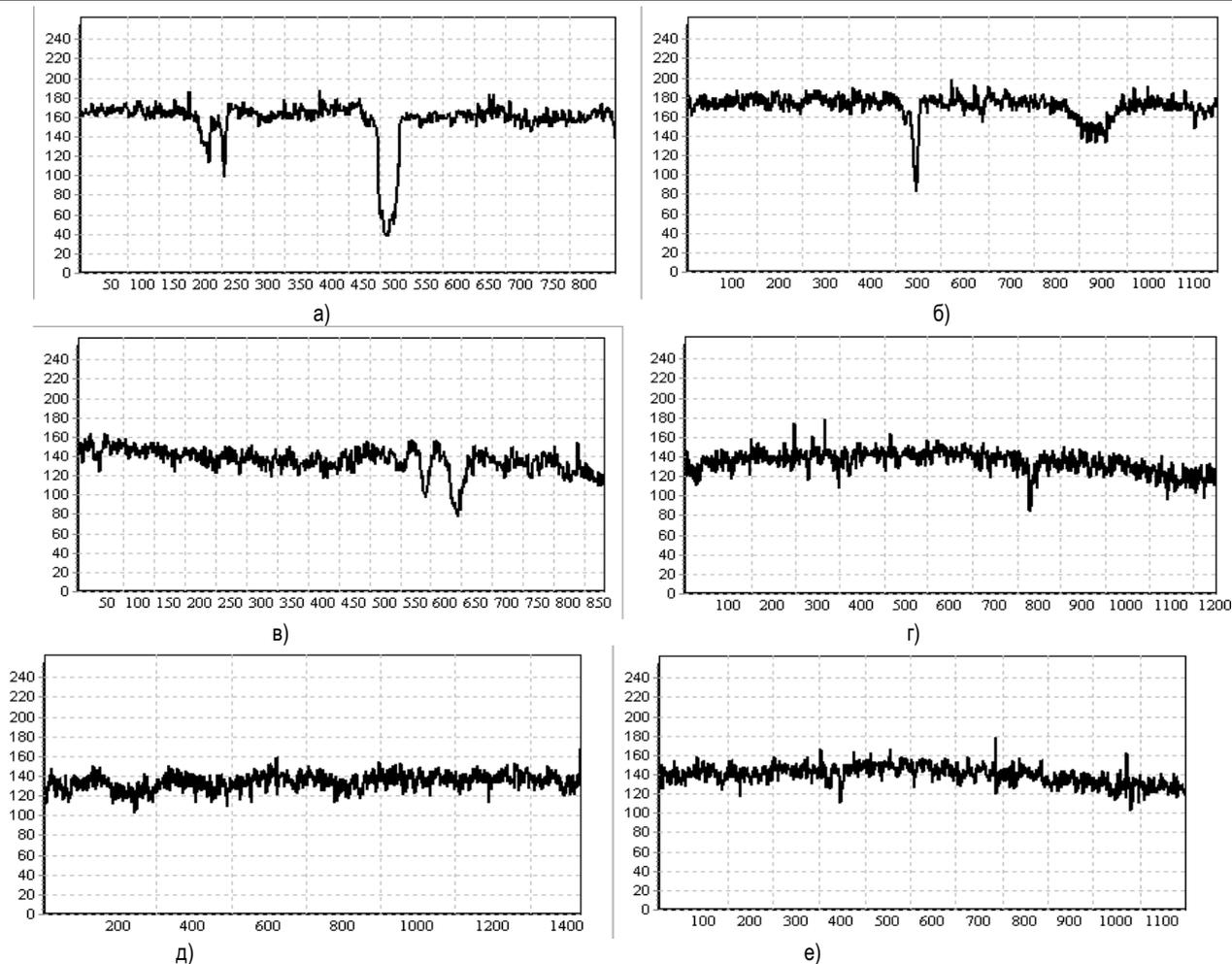
Алмазоподобные покрытия, формируемые по вакуумным технологиям, обладают повышенными прочностными, антифрикционными, адгезионными к подложке свойствами. Получение данных параметров покрытий обусловлено технологическими особенностями формирования тонкослойных алмазоподобных соединений: процесс получения покрытий происходит в отсутствие кислорода, а также в ряде случаев при наличии защитных газовых сред, в результате чего возможно формировать композиционные покрытия в едином технологическом цикле. Достоинством плазмохимического получения алмазоподобных покрытий в вакууме является экологичность [11–12].

Многообразие свойств углеродных материалов обусловлено способностью углерода образовывать sp^1-sp^3 связи в различных соотношениях. Но только его псевдоаморфное состояние дает возможность сочетать в геометрически малых, порядка нескольких нанометров, областях материала два-три типа гибридных связей. Псевдоаморфное состояние позволяет реализовать большее число разупорядоченных структурных состояний, чем кристаллическое. Для пленок углеродных материалов, сочетающих аморфное, кристаллическое и частично кристаллическое состояние, распространено название «алмазоподобные покрытия». Перспективы их применения в различных областях науки и техники определяются уникальным комплексом свойств алмазоподобных углеродных покрытий.



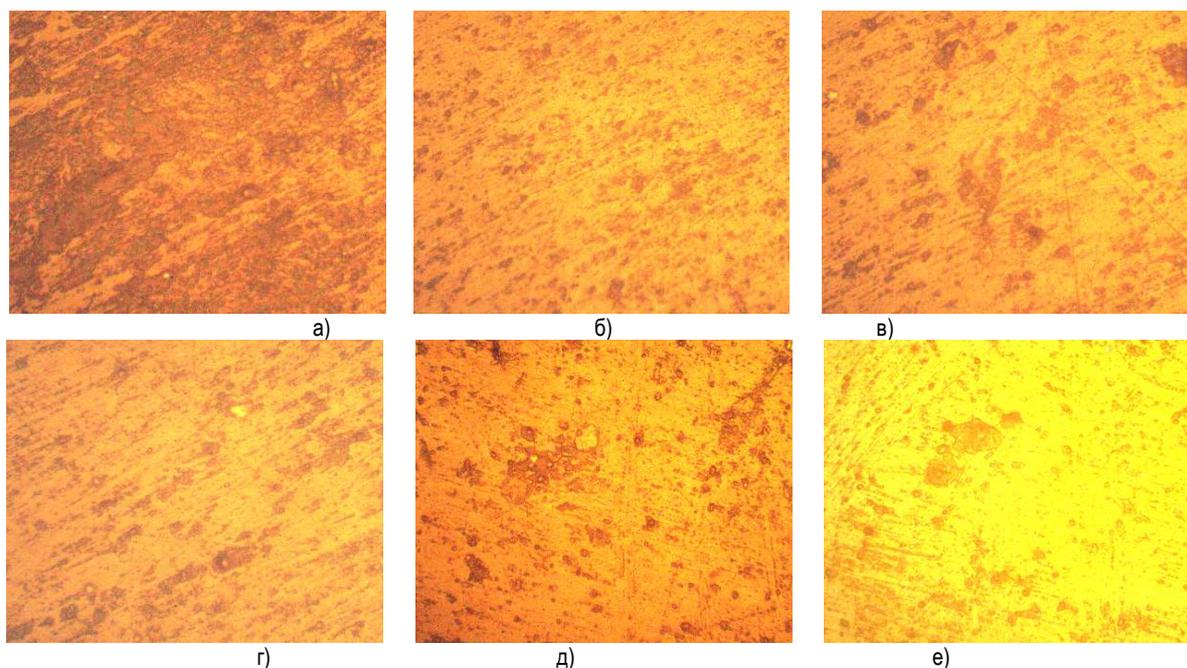
а) исходный образец; б–е) обработка в криогенной жидкости в течение:
б) 30 минут; в) 60 минут; г) 120 минут; д) 720 минут; е) 1440 минут

Рисунок 1 – Морфология поверхности стальных изделий после проведения предварительного упрочнения в криогенной жидкости ($\times 350$)



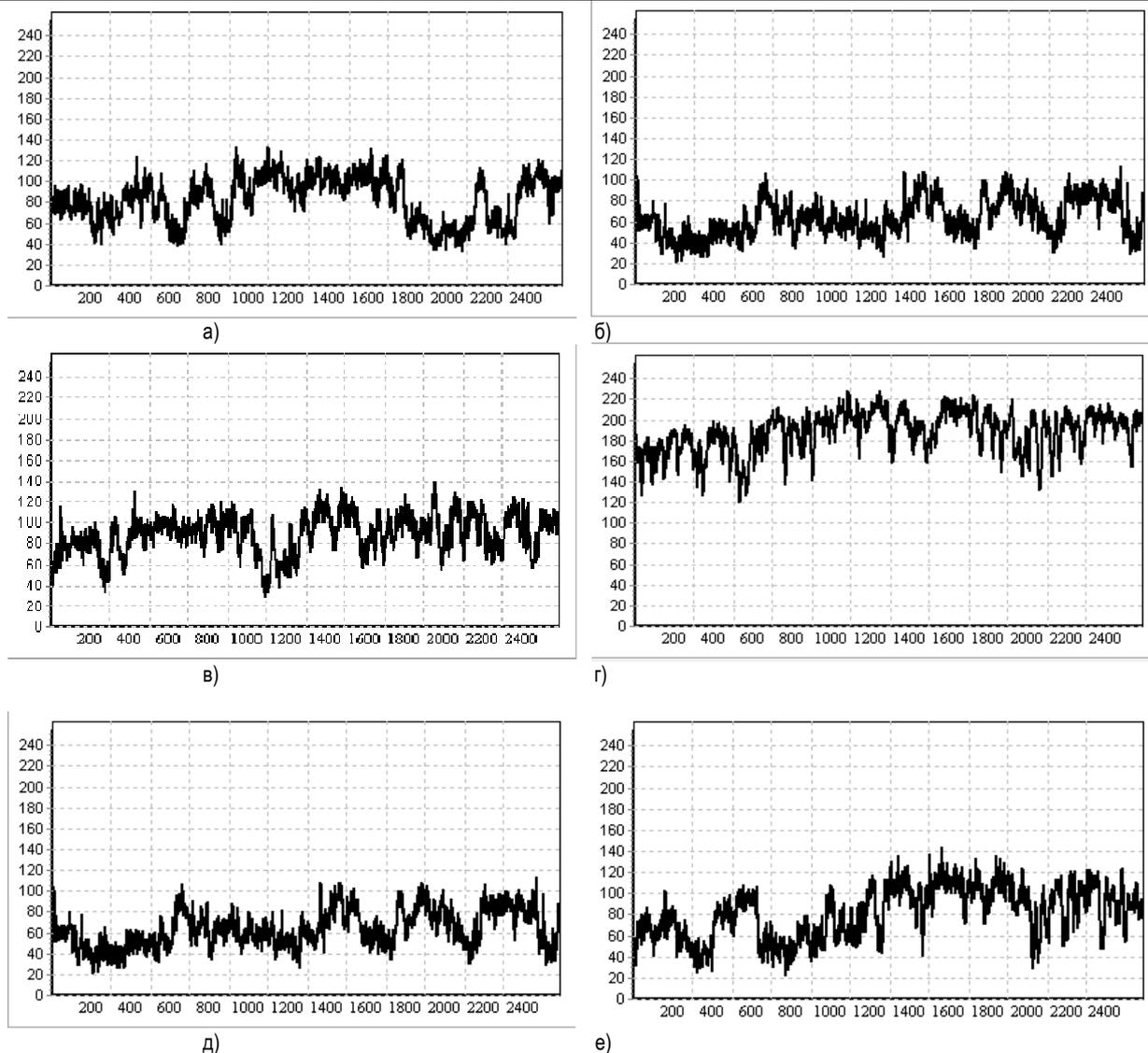
а) исходный образец; б–е) обработка в криогенной жидкости в течение:
 б) 30 минут; в) 60 минут; г) 120 минут; д) 720 минут; е) 1440 минут

Рисунок 2 – Топография поверхности стальных изделий после проведения предварительного упрочнения в криогенной жидкости



а) исходный образец; б–е) обработка в криогенной жидкости в течение:
 б) 30 минут; в) 60 минут; г) 120 минут; д) 720 минут; е) 1440 минут ($\times 500$)

Рисунок 3 – Морфология поверхности нанокпозиционных алмазоподобных покрытий, сформированных на предварительно упрочненных стальных субстратах



а) исходный образец; б–е) обработка в криогенной жидкости в течение:
 б) 30 минут; в) 60 минут; г) 120 минут; д) 720 минут; е) 1440 минут

Рисунок 4 – Топография поверхности нанокпозиционных АПП, сформированных на стальных субстратах после проведения предварительного упрочнения в криогенной жидкости

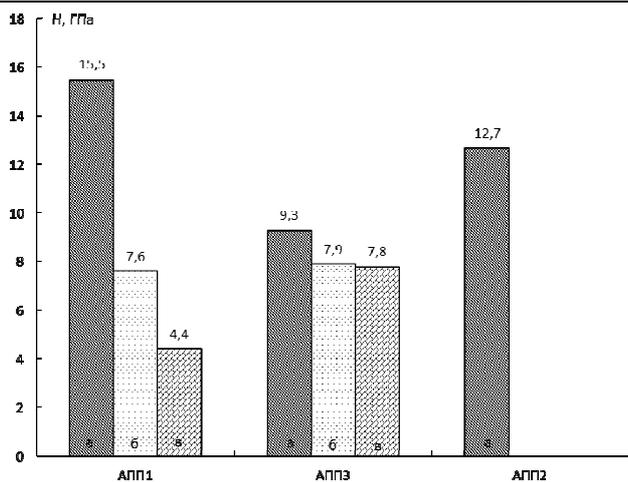
Алмазоподобные покрытия, осажденные на различные подложки, могут использоваться в качестве теплопроводов полупроводниковых приборов, просветляющих покрытий для фотоэлементов солнечных батарей, абразивных материалов, пассивирующих и изолирующих пленок, покрытий оптических деталей, износостойких покрытий для повышения эксплуатационного ресурса инструмента, трибологических покрытий в прецизионных узлах трения, защитных покрытий на головках устройств хранения информации и магнитных дисках, коррозионностойких покрытий. Одной из причин, ограничивающих применение алмазоподобных покрытий, является наличие крупных, от долей микрона до нескольких десятков микрон, частиц (МЧ) в плазменном потоке при получении катодно-дуговым методом. Наличие МЧ существенно снижает антикоррозионные и защитные свойства алмазоподобных покрытий, так как они являются источниками дефектов типа каверн, возникающих при отделении макрочастиц от покрытия из-за низкой адгезионной связи макрочастицы с подложкой. Данные частицы могут образовываться и при внешних воздействиях, в частности при термообработке, криогенном воздействии на покрытие [13-14].

В качестве объекта исследований применяли фторированные алмазоподобные покрытия (АПП1, АПП2, АПП3). Данные покрытия подвергались воздействию криогенных температур при $T=77,74$ К.

Данные образцы выдерживались в жидком азоте при температуре кипения от 60 до 480 минут.

Исходя из имеющихся в литературных источниках данных в спектрах алмазоподобных покрытий, сформированных на стальном субстрате, наблюдаются полосы поглощения, лежащие в области $520-630$ см^{-1} ; $950-1300$ см^{-1} ; $2200-3000$ см^{-1} . Полосы поглощения, лежащие в области $950-1300$ см^{-1} , можно отнести к валентным колебаниям С-Н групп. Полосы поглощения, лежащие в области $2200-3000$ см^{-1} , состоят из пиков валентных колебаний карбонильных групп, одинарных С-С, и двойных С=С связей и деформационных колебаний С-Н-групп. При этом наблюдались пики в области 2100 см^{-1} , 1000 см^{-1} , отвечающие валентным колебаниям С=C-связей [15-16].

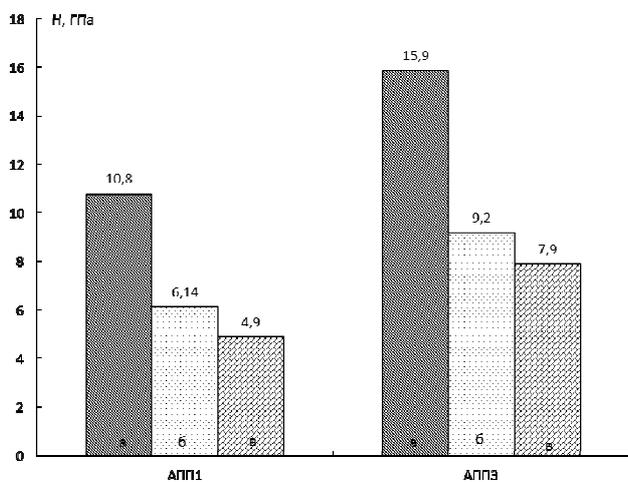
В работах [14, 17] было показано увеличение значений микротвердости покрытий на основе керамики (карбид хрома, карбонитрид хрома, нитрид хрома, нитрид титана) при обработке в криогенной жидкости. Проведенные исследования по изучению прочностных характеристик алмазоподобных покрытий показали неоднозначность влияния криогенных жидкостей на прочностные характеристики алмазоподобных покрытий (рисунки 5-9).



а, АПП1 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП1 – нагрузка на индентор 25 грамм; в, АПП1 – нагрузка на индентор 50 грамм; а, АПП3 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП3 – нагрузка на индентор 25 грамм; в, АПП3 – нагрузка на индентор 50 грамм; а, АПП2 – нагрузка на индентор 10 грамм

Рисунок 5 – Микротвердость алмазоподобных покрытий в зависимости от технологических режимов формирования

Исходя из представленных данных видно, что технологические режимы формирования алмазоподобных покрытий оказывают существенное влияние на прочностные характеристики углеродных слоев.



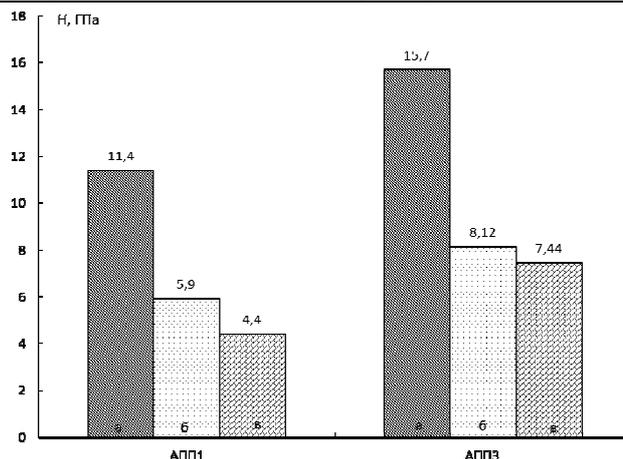
а, АПП1 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП1 – нагрузка на индентор 25 грамм; в, АПП1 – нагрузка на индентор 50 грамм; а, АПП3 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП3 – нагрузка на индентор 25 грамм; в, АПП3 – нагрузка на индентор 50 грамм

Рисунок 6 – Микротвердость алмазоподобных покрытий после обработки в криогенной жидкости в течение 60 минут

Увеличение времени выдержки в жидком азоте до 420 минут образца АПП1 приводит к возрастанию значений микротвердости до 15,8 ГПа.

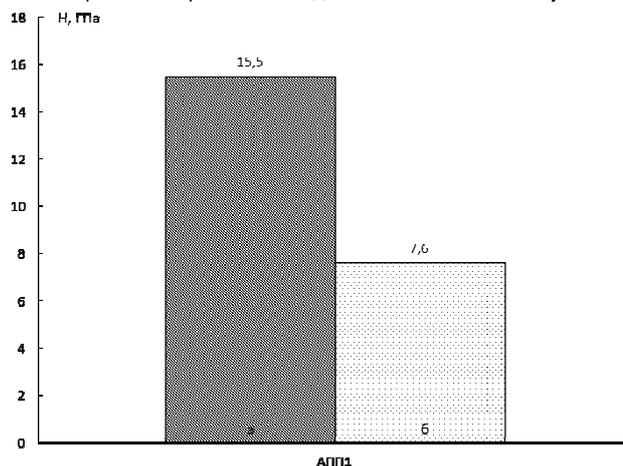
Заключение

Обработка в криогенной среде в общем случае приводит к возрастанию значений микротвердости покрытий АПП. Однако данный процесс зависит от предыстории образца, который оказывает существенное влияние на кинетику изменений микротвердости алмазоподобных покрытий.



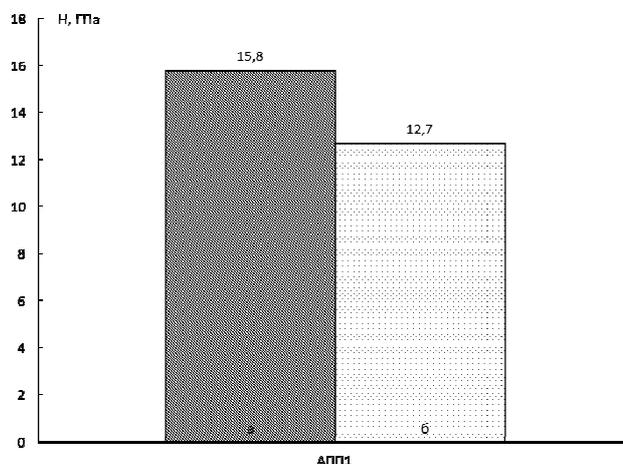
а, АПП1 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП1 – нагрузка на индентор 25 грамм; в, АПП1 – нагрузка на индентор 50 грамм; а, АПП3 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП3 – нагрузка на индентор 25 грамм; в, АПП3 – нагрузка на индентор 50 грамм

Рисунок 7 – Микротвердость алмазоподобных покрытий после обработки в криогенной жидкости в течение 180 минут



а, АПП1 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП1 – нагрузка на индентор 25 грамм

Рисунок 8 – Микротвердость алмазоподобных покрытий после обработки в криогенной жидкости в течение 240 минут



а, АПП2 – нагрузка на индентор 10 грамм; б, АПП2 – нагрузка на индентор 25 грамм

Рисунок 9 – Микротвердость алмазоподобных покрытий после обработки в криогенной жидкости в течение 420 минут

Список цитированных источников

1. Овчинников, Е. В. СВЧ-модифицирование алмазоподобных покрытий / Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, Н. М. Чекан // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 84–93.
2. Структурно-морфологические особенности алмазоподобных покрытий, модифицированных свч-излучением / Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, Ю. И. Павлович, И. А. Петропаловский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов / ДонНТУ, Донецк, 2011. – Выпуск 42. – С. 230–238.
3. Плазменные технологии модифицирования конструкционных материалов / Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, К. В. Кравченко, А. Г. Шагойка, Г. М. Сенченко // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 98–105.
4. Tsai Hsiao-chu, Bogy D.B. // J. Vac. Sci. Technol. 1987. – Vol. A 5 (6). – P. 3287–3312.
5. Алмазоподобные антифрикционные покрытия / Е. В. Овчинников, В. А. Струк, Н. М. Чекан, Е. И. Эйсымонт // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 21–22 апреля 2011 г. : в 2 ч. / Могилев; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 1. – С. 193–194.
6. Влияние термической обработки на структуру алмазоподобных покрытий / Е. В. Овчинников, В. А. Струк, В. И. Кравченко, М. М. Войтович // Материалы 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16–20 мая 2011 г., Харьков, Украина. – Харьков: ННЦ ХФТИ. – Харьков, 2011. – С. 271.
7. Himpfel F. J., Knapp J. A., Van Vechten J. A., Eastman D. E. // Phys. Rev. B. 1979. Vol. 20. – P. 624–627.
8. J. Ristein, Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process. – № 82. – 2006. – 377 p.
9. L. Tang, W.W. Gerbirich, L. Kruckeberg, D.R. Kanai // Biomaterials. – № 16. – 1995. – 483 p.
10. D. M. Gruen, S. Liu, A.R. Krauss, X. Pan, J. // Appl. Phys. – № 75. – 1994. – 1758 p.
11. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия : монография / А. А. Андреев [и др.] – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
12. Андриевский, Р. А. Пленки как характерные консолидированные наноматериалы / Р. А. Андриевский // Наноструктурное материаловедение. – 2006. – № 1. – С. 1–49.
13. Чекан, Н. М. Термостойкие вакуумные покрытия для металлообрабатывающего инструмента / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. – Сер 6. Тэхніка. – 2015. – № 1(198). – С. 30–36.
14. Овчинников, Е. В. Физико-механические характеристики вакуумных покрытий, обработанных при криогенной температуре / Е. В. Овчинников [и др.] // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. – Сер 6. Тэхніка. – 2018. – Т. 8. – № 2. – С. 6–16.
15. Особенности структуры и морфологии алмазоподобных покрытий, модифицированных СВЧ-излучением / Е. В. Овчинников [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/3 (288). – С. 54–61.
16. Особенности колебательных спектров алмазоподобных и полимероподобных пленок α -C:H / Е. А. Коншина [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – № 6. – С. 616–622.
17. Овчинников, Е. В. Триботехнические характеристики покрытий на основе карбонитрида циркония, подвергнутых криогенной обработке / Е. В. Овчинников [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC-2018» : матер. Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 19–23 ноября 2018 г. / Редкол.: А. С. Сигов. – Москва : РТУ МИРЭА, 2018. – С. 358–362.

References

1. Ovchinnikov, E. V. SVCH-modificirovaniealmazopodobnyh pokrytij / E. V. Ovchinnikov, E. I. Ejsymont, N. M. CHekan // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2011. – № 3. – S. 84–93.
2. Strukturno-morfologicheskie osobennostialmazopodobnyh pokrytij, modifitsirovannyh svch-izlucheniem / E. V. Ovchinnikov, E. I. Ejsymont, YU. I. Pavlovich, I. A. Petropalovskij // Progressivnyetekhnologii i sistemy mashinostroeniya: Mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov / DonNTU, Doneck, 2011. – Vypusk 42. – S. 230–238.
3. Plazmennyyetekhnologii modifitsirovaniya konstruktsionnyh materialov / E. V. Ovchinnikov, E. I. Ejsymont, K. V. Kravchenko, A. G. SHagojka, G. M. Senchenko // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2011. – № 4. – S. 98–105.
4. Tsai Hsiao-chu, Bogy D.B. // J. Vac. Sci. Technol. 1987. – Vol. A 5 (6). – P. 3287–3312.
5. Almazopodobnye antifriktsionnyepokrytiya / E. V. Ovchinnikov, V. A. Struk, N. M. CHekan, E. I. Ejsymont // Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Mogilev, 21–22 aprelya 2011 g.: v 2 ch. / Mogilev; redkol.: I. S. Sazonov (gl. red.) [i dr.]. – Mogilev, 2011. – CH. 1. – S. 193–194.
6. Vliyanie termicheskoy obrabotki na strukturualmazopodobnyh pokrytij / E. V. Ovchinnikov, V. A. Struk, V. I. Kravchenko, M. M. Vojtovich // Materialy 51-j Mezhdunarodnoj konferencii «Aktual'nyeproblyemy prochnosti», 16–20 maya 2011 g., Har'kov, Ukraina. – Har'kov: NNC HFTI. – Har'kov, 2011. – S. 271.
7. Himpfel F. J., Knapp J. A., Van Vechten J. A., Eastman D. E. // Phys. Rev. B. – 1979. – Vol. 20. – P. 624–627.
8. J. Ristein, Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process. – № 82. – 2006. – 377 p.
9. L. Tang, W.W. Gerbirich, L. Kruckeberg, D.R. Kanai // Biomaterials. – № 16. – 1995. – 483 p.
10. D. M. Gruen, S. Liu, A.R. Krauss, X. Pan, J. // Appl. Phys. – № 75. – 1994. – 1758 p.
11. Vakuumno-dugovyye ustrojstva i pokrytiya : monografiya / A. A. Andreev [i dr.] – Har'kov: NNC HFTI, 2005. – 236 s.
12. Andrievskij, R. A. Plenki kak harakternyekonsolidirovannyye nanomaterialy / R. A. Andrievskij // Nanostrukturnoematerialovedenie. – 2006. – № 1. – S. 1–49.
13. CHekan, N. M. Termostojkie vakuumnyepokrytiya dlya metalloobrabatyvayushchego instrumenta / N. M. CHekan, E. V. Ovchinnikov // Vesnik GrDU imya YAnki Kupaly. – Ser 6. Tekhnika. – 2015. – № 1(198). – S. 30–36.
14. Ovchinnikov, E. V. Fiziko-mekhanicheskyye harakteristiki vakuumnyh pokrytij, obrabotannyh pri kriogennoj temperature / E. V. Ovchinnikov [i dr.] // Vesnik GrDU imya YAnki Kupaly. – Ser 6. Tekhnika. – 2018. – T. 8. – № 2. – S. 6–16.
15. Osobennosti struktury i morfologiialmazopodobnyh pokrytij, modifitsirovannyh SVCH-izlucheniem / E. V. Ovchinnikov [i dr.] // Fundamental'nyei prikladnyeproblyemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 4/3 (288). – S. 54–61.
16. Osobennosti kolebatel'nyh spektrovalmazopodobnyh i polimeropodobnyh plenok α -C:N / E. A. Konshina [i dr.] // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2006. – № 6. – S. 616–622.
17. Ovchinnikov, E. V. Tribotekhnicheskyye harakteristiki pokrytij na osnove karbonitrida cirkoniya, podvergnutyh kriogennoj obrabotke / E. V. Ovchinnikov [i dr.] // Fundamental'nyeproblyemy radioelektron-nogo priborostroeniya «INTERMATIC-2018» : mater. Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf., Moskva, 19–23 noyabrya 2018 g. / Redkol.: A. S. Sigov. – Moskva : RTU MIREA, 2018. – S. 358–362.

Материал поступил в редакцию 18.10.2020