

Российская Академия Наук
Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
Университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
При поддержке: ООО «Мономакс»

ПЛЕНКИ И ПОКРЫТИЯ – 2021

ТРУДЫ 15-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

18 мая – 20 мая 2021

Санкт - Петербург

2021

Пленки и покрытия-2021: Труды 15-й Международной конференции. 18 мая – 20 мая 2021 г. Под редакцией д-ра техн. наук В.Г. Кузнецова. – СПб: Изд-во ООО "РПК "АМИГО-ПРИНТ", 2021. – 436 с.

Труды составлены по материалам докладов, представленных на 15-ю Международную конференцию «Пленки и покрытия – 2021». В материалах докладов изложены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований в области физики и механики конденсированных сред, формирования пленок и покрытий плазменными и смежными методами, полученными за последние два года, прошедшие после проведения предыдущей конференции. Особое внимание уделено изучению свойств покрытий и методам их исследований, новым материалам покрытий и новым областям их использования, наноматериалам и нанотехнологиям, физике и механике плазмы, взаимодействию плазмы с поверхностью твердого тела, разработке современного оборудования и технологических процессов, а также вопросам, связанным с управлением, автоматизацией и роботизацией. Намечены пути развития новых методов получения пленок и покрытий.

Труды представляют интерес для специалистов, занимающихся научными исследованиями, разработкой технологических процессов, связанных с получением пленок и покрытий, вопросов упрочнения, восстановления деталей и коррозионной защиты, изучением свойств покрытий и других применений.

Организационный комитет

Кузнецов В.Г. (ИПМаш РАН) – д.т.н., председатель
Григорьев Л.В. (Университет ИТМО) – к.т.н., сопредседатель
Гильманова А.Т. (ООО «Мономакс»)
Кострин Д.К. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») – к.т.н.
Михайлов А.В. (АО НПО ГОИ им. С.И. Вавилова) – к.т.н.
Фролов В.Я. (СПбПУ) – проф., д.т.н.

Программный комитет

Кузнецов В.Г. (ИПМаш РАН) – зав. лаб., д.т.н., председатель
Глухих В.А. – академик РАН
Григорьев Л.В. (Университет ИТМО) – к.т.н., сопредседатель
Григорьев С.Н. (МГТУ «СТАНКИН») – проф., д.т.н.
Коваль Н.Н. (ИСЭ СО РАН) – д.т.н.
Кудинов В.В. (ИМЕТ) – проф., д.т.н.
Кузьмичев А.И. (НТУУ «КПИ», Украина) – проф., д.т.н.
Лозован А.А. (МАИ) – проф., д.т.н.
Лясников В.Н. (СГТУ) – проф., д.т.н.
Погребняк А.Д. (СГУ, Украина) – проф., д.т.н.
Потрахов Н.Н. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») – проф., д.т.н.
Руденская Н.А. (БНТУ, Беларусь) – в.н.с., д.т.н.
Сергеев В.П. (ИФПМ СО РАН) – д.т.н.
Шаповалов В.И. (СПб ГЭТУ «ЛЭТИ») – проф., д.т.н.
Якупов Н.М. (ИММ КазНЦ РАН) – проф., д.т.н.

Ответственность за достоверность сведений и хранение
государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-6045715-1-4



9 785604 571514

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
проблем машиноведения РАН, 2021

ЭВОЛЮЦИЯ СВОЙСТВ АЛМАЗОПОДОБНЫХ НАНОПЛЕНОК НА СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ

Кузнецова Т.А.¹, Лапицкая В.А.¹, Торская Е.В.², Муравьева Т.И.², Мезрин А.М.², Самардак В.Ю.³, Хабарова А.В.¹, Трухан Р.Э.¹, Чижик С.А.¹

1 - Институт тепло и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

2 - Институт проблем механики им. Ишлинского РАН, Москва, Россия

3 - Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
kuzn06@mail.ru

Представлены результаты исследования поверхности алмазоподобных покрытий (АПП) толщиной 100, 300 и 500 нм, нанесенных на закаленную сталь ШХ15 методами лазерной абляции и импульсным дуговым разрядом. Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследована топография и определены шероховатость, сила адгезии и удельная поверхностная энергия покрытий до и после трибоиспытаний. Методом наноиндентирования (НИ) установлены изменения модуля упругости E и микротвердости H поверхности после воздействия трения скольжения без смазки.

Стремление к сочетанию износостойкости с низким коэффициентом трения заставляет уделять повышенное внимание свойствам вторичных структур на поверхностях деталей трения. Образующиеся в процессе трения вторичные структуры существенно снижают коэффициент трения, защищают поверхность от износа. В последнее десятилетие для снижения износа и уменьшения трения рабочих поверхностей контактирующих деталей широко применяются АПП [1]. Расширению областей применения АПП во многом способствовало легирование металлами (Ti, Cr, Mo, W, Ni, Al, Cu, Ag, Ta) и использование адгезионных подслоев, обеспечивающих прочную адгезию и промышленное применение покрытий. Эволюция свойств покрытий при трении принимается в расчет при выборе оптимальных технологических режимов нанесения и эксплуатации [2]. Морфология измененной поверхности объясняет трибологические свойства детали. В работе [3] визуализирован механизм износа алмаза на наноуровне в процессе трения. С помощью ТЭМ показано, как плоские аморфные «чешуйки» диаметром около 50 нм и толщиной в один атом смещаются с алмазного острия в зону трения. Аморфизация способствует снижению коэффициента трения и в трибопарах, выполненных из композиционных материалов с использованием алмазных и алмазоподобных структур [4]. В работе [5] визуализация вторичных трибоструктур АПП, легированных Ti, выполнена АСМ, которая показывает существенную пластическую деформацию поверхностных слоев. Использование возможностей АСМ с высокочувствительной силовой регистрацией позволяет одновременно оценить морфологию, силы адгезии между зондом и поверхностью и шероховатость. Учет наношероховатостей АПП позволяет объяснить высокие нормальные напряжения в

контакте [6], способствующие протеканию механохимических реакций и формированию вторичных структур.

Целью данной работы является экспериментальное исследование методом наноиндентирования и атомно-силовой микроскопии (АСМ) изменений морфологии и механических свойств алмазоподобных покрытий (АПП) толщиной 100, 300 и 500 нм под действием трения.

Образцы АПП наносили на подложки из закаленной полированной стали марки ШХ15 методами лазерной абляции (Pulse laser deposition, PLD) и осаждением импульсным дуговым разрядом (Laser arc PVD) на установке SWISSNANOCOAT PVD COATING SYSTEM (NCI-Swissnanocoat, Швейцария). Перед нанесением алмазоподобного покрытия для лучшей адгезии у образцов с толщиной покрытия 300 и 500 нм создавали титановый подслои толщиной около 800 нм. У образца с толщиной 100 нм подслои отсутствуют. Трибологические испытания проведены с использованием общепринятой схемы трения «палец-диск» при вращательном движении (ASTM G99), реализуемых на серийных машинах трения UMT-2 фирмы CETR (США).

Исследования топографии и количественное определение сил адгезии и удельной поверхностной энергии поверхности покрытий проводились на микроскопе Dimension FastScan компании Bruker в режиме PeakForce QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа NSC-11 (производство MicroMash, Эстония) с радиусом закругления острия 10 нм, с жесткостью консоли 4,8 Н/м. Для данных твердых покрытий режим QNM при использовании кремниевого зонда позволяет оценить распределение адгезионных сил по поверхности и, таким образом, лучше выявить различные фазы и границы зерен. Сила адгезии между острием АСМ-зонда и поверхностью определялась по максимальной силе отрыва острия кантилевера от поверхности образцов из силовых кривых «подвода-отвода» QNM. Шероховатость покрытий (R_a , R_q и R_z) в QNM режиме оценивали на площадях 5×5 мкм².

Измерение механических свойств алмазоподобных покрытий проводили путем внедрения трехгранной алмазной пирамиды Берковича с непрерывной регистрацией деформационных кривых на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США).

Глубину дорожек трения (на каждой дорожке в трех местах) измеряли контактным профилометром SurfTest SJ-210 (Mitutoyo, Япония). Величину износа покрытий установить не удалось, так как глубина дорожки трения оказалась ниже чувствительности профилометра (20 нм).

Методом АСМ выявлены различия морфологии между исходной поверхностью и дорожкой трения, которые проявляются в повышенном количестве микрочастиц размером 20 – 200 нм после трибоиспытаний. При этом морфология поверхности дорожек трения очень близка к исходной, изометрична, без признаков текстурирования материала из-за пластической деформации, шероховатость повышена не более чем в 1,4 раза. Удельная поверхностная энергия с увеличением толщины алмазоподобного покрытия снижается.

Значения E и H АПП составляют 192 и 17,4 ГПа для 100 нм, 205 и 19,8 ГПа для 300 нм, 175 и 17,3 ГПа для 500 нм и соответствуют значениям для покрытий, нанесенных на титановый сплав и содержащих примеси Ti [7]. В дорожке трения значения E и H близкие 194 и 18,0 ГПа для 100 нм, 190 и 17,4 ГПа для 300 нм, 177 и 17,9 ГПа для 500 нм. Существеннее остальных покрытий понизились свойства АПП толщиной 300 нм. Соотношение H/E у покрытий составляло 0,09 – 0,10 и не снизилось в дорожке трения.

Полученные результаты свидетельствуют об образовании на поверхности углеродных покрытий на стали под действием трибологической нагрузки измененного слоя. Морфология слоя при этом практически не изменяется и о его присутствии можно судить только по изменению значений E и H , выявленных НИ и изменению удельной поверхностной энергии.

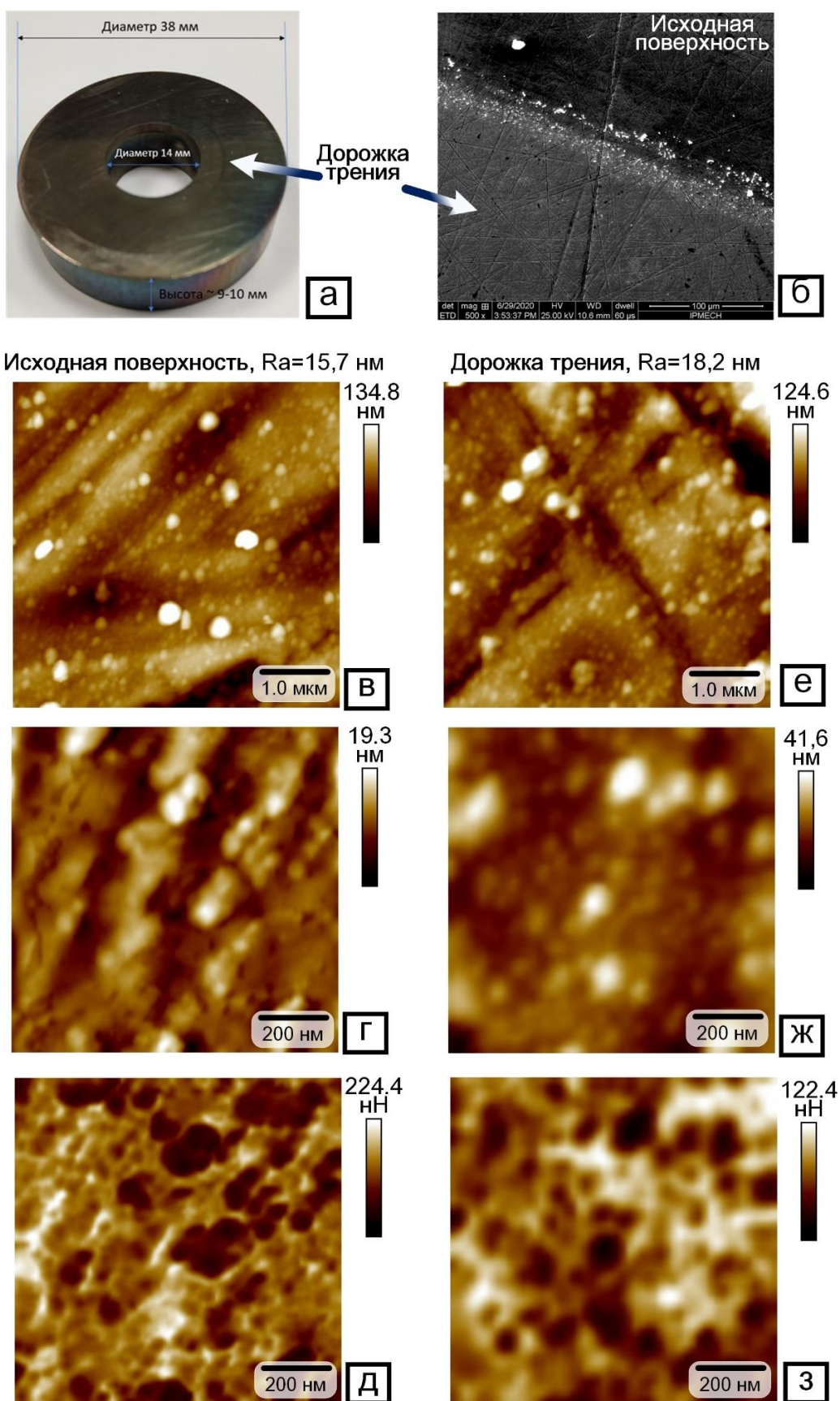


Рис.1. Изображения покрытия DLC толщиной 100 нм: а – образец с покрытием; б – вид дорожки трения, СЭМ, $\times 500$; в-з– АСМ-изображения; в,г,д – исходная поверхность; е,ж,з – дорожка трения; в,г, е,ж – топография; д, з – адгезионный контраст

Литература

- [1]. VM Anishchik, VV Uglov, AK Kuleshov et al. Electron field emission and surface morphology of aC and aC: H thin films //Thin Solid Films, V. 482, Is.1–2, 2005, Pp. 248-252
- [2]. Горячева И.Г., Торская Е.В. Моделирование влияния технологии нанесения покрытий на характеристики контактного взаимодействия // Механика твердого тела, № 5 2016, С. 52 -60.
- [3]. Visualization of nanoscale wear mechanisms in ultrananocrystalline diamond by in-situ TEM tribometry Rodrigo A. Bernal 1, Robert W. Carpick // Carbon 154 (2019) 132e139
- [4]. Wear resistance of composite chromium coatings with ultra-dispersed diamond additives. MA Andreev, TA Kuznetsova, LV Markova, VA Chekan // Journal of Friction and Wear, 2001 V7 Is 4 423-428
- [5]. Role of dimple textured surface on tribological properties of Ti/Al-codoped diamond-like carbon films Xiaowei Xua, Peng Guo, Leslie Ching Ow Tiong, Xiao Zuo et al. //Thin Solid Films 708 (2020) 138136
- [6]. Моделирование фрикционного взаимодействия шероховатого индентора и двуслойного упругого полупространства, Торская Е.В. //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 2. С. 31-36.
- [7]. Investigation on mechanical properties of tribofilm formed on Ti–6Al–4V surface sliding against a DLC coating by nano-indentation and micro-pillar compression techniques H.H. Dinga, V. Fridrici, G. Guillonneau et al. // Wear 432–433 (2019) 202954