

также присоединилась шкала «неподвижное–движущееся» (15), отражающее стабильность, а не сложность объекта. Все это характеризует восприятие респондентами изучаемого объекта машиностроения.

Таким образом, в рамках предложенного универсального семантического пространства для таких объектов, как подшипник, зубчатое колесо и болт, выделены четыре фактора «Оценка», «Активность», «Сила и стабильность», «Сложность» (в идеальном случае «Сила и стабильность» должна разделиться на два отдельных фактора). Сформированные факторы показывают, что респонденты выделяют данные характеристики при оценке объекта, даже не отдавая себе в этом отчет, а значит в назначении баллов наблюдается система. Однако низкий уровень, на котором происходит объединение шкал в кластеры, говорит о

достаточно высокой степени близости между ними, о близких оценках. Дополнение универсального семантического дифференциала частным, позволяющим провести более тонкий семантический анализ, возможно, позволит повысить степень различимости между шкалами и между самими объектами. Кластеризация деталей не проводилась из-за их малого количества.

Литература

1. Кухта, М. С. Оценка критериев визуально-комфортного сценария освещения производственного помещения методом семантического дифференциала / М. С. Кухта, М. О. Васильева // Эргодизайн. – 2021. – № 1 (11). – С. 57–63.
2. Токарь, О. В. Определение семантической структуры зрительного поля экрана методом семантического дифференциала / О. В. Токарь // Труды БГТУ. Серия 4: Принт- и медиатехнологии. – 2019. – № 1. – С. 36–40.

УДК 621.2.082.18, 620.178.143

НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ

Трухан Р.Э.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Торская Е.В.³, Муравьёва Т.И.³, Мерзин А.М.³, Самардак В.Ю.⁴

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

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН
Москва, Российская Федерация

⁴Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. Проведено испытание алмазоподобных покрытий толщиной 100, 300 и 500 нм на стали методом наноскретч-теста. В результате получены значения коэффициента трения при нагрузках 200, 1400 и 2500 мкН. Наименьшим коэффициентом трения до нагрузки 1400 мкН обладает покрытие толщиной 500 нм $0,29 \pm 0,08$.

Ключевые слова: алмазоподобные покрытия, наноскретч-тест, коэффициент трения, атомно-силовая микроскопия.

SCRATCH TEST OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS ON STEEL

Trukhan R.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Habarova A.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Torskaya E.³, Myravyeva T.³, Merzin A.³, Samardak V.⁴

¹A.V. Lukov Heat- and Mass Transfer institute NAS Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

³Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS
Moscow, Russian Federation

⁴School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Nanoscratch-test of diamond-like coating on steel with 100, 300 and 500 nm thickness was carried out. As a result, the friction coefficient values were obtained for loads of 200, 1400, and 2500 μN . The smallest coefficient of friction up to a load of 1400 μN has a coating with 500 nm thickness 0.29 ± 0.08 .

Key words: Diamond like carbon coatings, nanoscratch-test, friction coefficient, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Трухан Р.Э., ул. Петруся Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Введение. Алмазоподобные покрытия (АПП) обладают вариативностью структуры, которая придает им свойства, необходимые для применения в качестве износостойких и упрочняющих покрытий поверхностей различных изделий. Среди

покрываемых объектов могут быть как компоненты машин, деталей приборов, так и микроразмерные устройства [1, 2].

Структура близкая к алмазу в таких покрытиях приводит к повышению твердости, когда

графитоподобная – приводит к более легкому смещению слоев на поверхности покрытия, вызывая эффект самосмазывания.

В условиях микроконтакта трение происходит за счет столкновения неровностей, параметры которых характеризуют шероховатость поверхности. В случае АПП эти неровности могут обладать различной твердостью и модулем упругости, что влияет на их поведение в контакте. Более твердые структуры будут измельчать менее твердые или смещать слои с низким сопротивлением сдвигу [2].

Проведение наноскретч-теста позволяет симитировать контакт поверхности покрытия с единичной неровностью. В результате чего, можно получить сведения о поведении покрытия в условиях нагруженного скользящего контакта на микроуровне.

Целью работы является определения поведения алмазоподобных покрытий в условиях наноскретч-теста при разных нагрузках.

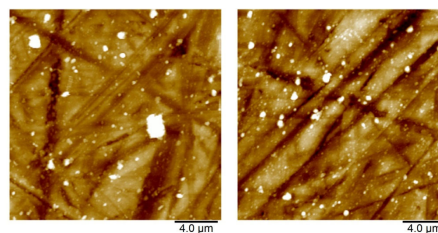
Материалы и методы исследования. Исследуемые покрытия представляют собой алмазоподобные углеродные пленки, нанесенные на поверхность стали ШХ15 с шероховатостью $R_a = 0,1$ нм методами лазерной абляции и осаждения импульсным дуговым разрядом на установке SWISSNANO COAT PVD COATING SYSTEM (NCI-Swissnanocoat, Швейцария) толщиной 100, 300 и 500 нм. Для 300 и 500-нанометровых покрытий предварительно наносился подслой титана толщиной 800 нм.

Получение изображений морфологии покрытий и определение шероховатости проводилось методом атомно-силовой микроскопии на микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping) на полях 20×20 мкм². Характеристики зонда – NSC-11 (MicroMasch, Эстония), радиус закругления острия – 10 нм, жесткость консоли – 4,8 Н/м.

Определение микротвердости и коэффициента трения ($k_{тр}$) выполнялись на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (Hysitron, США) алмазным индентором с радиусом закругления 226 нм и модулем упругости 1140 ГПа. Микротвердость оценивалась по модели Оливера-Фарра на основе 9 кривых индентирования при нагрузке 1000 мкН. $k_{тр}$ оценивался методом царапания при скорости 1,33 мкм/с, длине царапины – 20 мкм и нагрузках 200, 1400 и 2500 мкН.

Результаты и обсуждение. Коэффициент трения $k_{тр}$ при царапании индентором зависит от нагрузки, состояния поверхности, а также от твердости покрытия [3].

На поверхности с большей шероховатостью присутствует больше неоднородностей рельефа и частиц (рис. 1), взаимодействие индентора с которыми увеличивает величину стандартного отклонения (рис. 2).



а – 100 нм, б – 500 нм

Рисунок 1 – изображения поверхности (поля: 20×20 мкм) покрытий толщиной

Таблица 1. Свойства алмазоподобных покрытий

Параметр	Толщина покрытия		
	100 нм	300 нм	500 нм
R_a , нм	$24,7 \pm 1,2$	$24,4 \pm 1,2$	$18,6 \pm 0,9$
R_q , нм	$36,2 \pm 1,8$	$36,3 \pm 1,8$	$25,2 \pm 1,3$
R_z , нм	$53,6 \pm 2,7$	$40,9 \pm 2,0$	$35,2 \pm 1,8$
H, ГПа	$39,2 \pm 9,6$	$34,7 \pm 8,3$	$32,2 \pm 3,5$

Коэффициенты трения при нагрузках 200, 1400 и 2500 мкН показаны на рисунке 2. Покрытие толщиной 500 нм имеет самое низкое значения $k_{тр}$ при нагрузках 200 и 1400 мкН $0,21 \pm 0,06$ и $0,29 \pm 0,08$ соответственно, и самое высокое при 2500 мкН $0,49 \pm 0,03$. С повышением нагрузки при толщине 300 нм $k_{тр}$ изменяется от самого высокого до самого низкого с $0,26 \pm 0,08$ до $0,40 \pm 0,07$. $k_{тр}$ покрытия толщиной 100 нм занимает промежуточное положение при нагрузках 200 и 2500 мкН, но максимальное – при 1400 мкН ($k_{тр} = 0,34 \pm 0,08$).

Как видно из графика, с увеличением нагрузки на индентор меняется характер изменения $k_{тр}$ относительно толщины покрытия. При нагрузке 1100 мкН наблюдается снижение коэффициента трения с увеличением толщины покрытия, что хорошо согласуется с величиной микротвердости, определенной при нагрузке в 1000 мкН (табл. 1). При нагрузках 200 и 1400 мкН экстремумы значений $k_{тр}$ наблюдаются у АПП 300 и 500 нм.

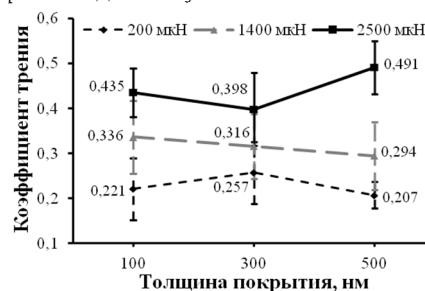


Рисунок 2 – Коэффициент трения при царапании АПП разной толщины

Резкое увеличение коэффициента трения покрытия толщиной 500 нм может быть следствием большей глубины царапины. Учитывая, что форма индентора сферическая, то с увеличением глубины внедрения увеличивается и площадь его контакта с покрытием. Это в свою очередь повышает силу трения, необходимую для царапания и, следовательно, коэффициент трения.

В процессе макротрения [1] покрытие толщиной 100 нм демонстрирует самый низкий коэффициент трения 0,57, когда при толщине 300 и 500 нм он составляет 0,79 и 0,61 соответственно. При переходе к царапанию реализуются большие контактные давления, и $k_{тр}$ в микромасштабе при толщине 100 нм становится больше, чем при 300 нм.

Заключение. Методом нанскретч-теста определены значения коэффициента трения алмазоподобных покрытий разной толщины на стальной подложке. Добавление подслоя титана и увеличение толщины покрытия снижали микротвердость и коэффициент трения покрытий. Для защиты поверхностей микроустройств можно рекомендовать покрытия толщиной 500 нм, за счет низкого коэффициента трения и меньшей шероховатости.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Ф20Р-217 и № Ф22М-006.

Литература

1. Evolution via friction of properties of DLC nanofilms on steel / Т. А. Kuznetsova [et. al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021.
2. Silicon addition as a way to control properties of tribofilms and friction of DLC coatings / Т. Kuznetsova [et al.] // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 608. – P. 155115.
3. Особенности наноскретч-теста при исследовании алмазоподобных покрытий / Р. Э. Трухан [и др.] // Приборостроение-2021 : матер. 14-й Междунар. науч.-техн. конфер., 17–19 ноября 2021 г., Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 239–241.

УДК 617-089.844

СВАРКА НИТИНОВЫХ ПРОВОЛОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТЕНТ-ГРАФТАХ

Уласевич А.О.¹, Минченя В.Т.², Савченко А.Л.²

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются различные методы сварки проволок нитинола, используемых в эндопротезах, и их воздействие на температурный интервал мартенситного превращения. Дается оценка наиболее подходящему методу сварки.

Ключевые слова: Стент-графт, нитинол, сварка, лазерно-импульсная, мартенситное превращение.

WELDING OF NITINOL WIRES USED IN STENT GRAFT

Ulasevich A.¹, Minchenya V.², Savchenko A.²

¹State enterprise “Science and technology park of BNTU Polytechnic”

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses various methods of welding nitinol wires used in endoprotheses and their effect on the temperature range of martensitic transformation. The most suitable welding method is evaluated.

Key words: Stent graft, nitinol, welding, laser pulse welding, martensitic transformation.

Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ulasevich_aleksandr@park.bntu.by

Стент-графт состоит из упругих элементов, которые поддерживают форму аорты и бесшовным полиэфирным материалом, выполняющий функцию недопуская попадая кровотока в ослабленные участки стенок аорты. Упругие элементы выполнены из материала с «памятью формы». Сплав этот называется – нитинол (сплав титана и никеля), обладающий высокой коррозионной и эрозивной стойкостью (рис. 1).



Рисунок 1 – Стент-графт грудного отдела аорты

При применении сплавов с эффектом памяти формы в медицине необходимо, чтобы они обеспечивали не только надежность выполнения механических функций, но и химическую надежность (сопротивление ухудшению свойства в биологической среде, сопротивление разложению, растворению, коррозии), биологическую надежность (биологическую совместимость, отсутствие токсичности, канцерогенности, сопротивление образованию тромбов и антигенов). Простые металлические элементы имеют сильное токсичное действие, но в соединении с другими элементами обнаруживается эффект взаимного ослабления токсичности. Однако большее значение, чем образование ионов, имеет растворимость пассивирующих пленок, возникающих на поверхности металлов. Например, используемые в качестве биологических материалов хромоникелевые сплавы, кобальтхромовые сплавы, чистый Ti,