

УДК 532.2; 620.197

DOI 10.17073/1997-308X-2015-2-66-72

## Перспективы применения алмазоподобных покрытий для деталей узлов трения, работающих в коррозионно-абразивной среде

© 2015 г. В.Г. Гилев

Научный центр порошкового материаловедения (НЦ ПМ)

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Статья поступила в редакцию 17.10.14 г., доработана и подписана в печать 06.11.14 г.

Гилев В.Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НЦ ПМ (614013, г. Пермь, ул. Проф. Поздеева, 6). E-mail: Xray@pm.pstu.ac.ru.

Обсуждаются проблемы применения алмазоподобных покрытий (АПП) на стальных деталях насосов для нефтедобывающей промышленности. Основной акцент сделан на обзор путей повышения адгезии покрытий, анализ причин разрушения алмазоподобных и других сверхтвердых покрытий в водо- и абразивосодержащей средах. Главная причина разрушения АПП на деталях в водосодержащей среде при абразивном изнашивании – это катастрофическое снижение адгезии при попадании воды на границу подложка–покрытие. Для получения относительно толстых защитных алмазоподобных покрытий необходим поиск путей повышения адгезии и снижения внутренних напряжений. Приведены данные о предельных нагрузках ( $L_c$ ) при испытаниях АПП царапанием в зависимости от технологии их получения, толщины покрытий, наличия промежуточных слоев, способов подготовки поверхности подложек. Показаны примеры достижения высоких значений  $L_c$  за счет применения специальных методов химико-термической обработки стальных подложек

**Ключевые слова:** алмазоподобные покрытия, адгезия, критическая нагрузка при царапании.

Problems of applying the diamond-like coatings (DLC) on steel parts of pumps for the petroleum industry are discussed. The main accent is made on the review of the ways for increasing the adhesion of coatings and analysis of the causes of destruction of diamond-like and other superhard coatings in water-containing and abrasive-containing media. The main cause of destruction of DLCs on the parts in water-containing media during the abrasive wear is the catastrophic adhesion lowering upon the water ingress on the substrate-coating interface. To fabricate the relatively thick protective DLCs, the search for the ways of increasing adhesion and lowering internal stresses is necessary. The data on limiting loads ( $L_c$ ) during the tests of DLCs by scratching depending on their fabrication technology, coating thickness, presence of intermediate layers, and preparation techniques of the substrate surface are presented. Examples of attaining high values of  $L_c$  due to applying special methods of chemicothermal treatment of steel substrates are shown.

**Keywords:** diamond-like coatings, adhesion, critical load under scratching.

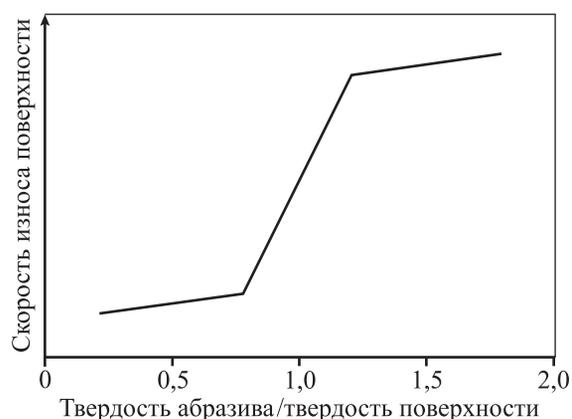
### Введение

Износ — принципиальный вопрос (основная проблема) в работе многоступенчатых погружных насосов, перекачивающих жидкости, содержащие твердые частицы. Он приводит не только к изменениям размеров и состояния поверхностей деталей, но и существенно влияет на гидравлические и механические характеристики, снижает эффективность, надежность и самое главное — время службы насосов [1].

Абразивный износ происходит за счет попадания твердых частиц в узкие щели между деталями насоса, движущимися относительно друг друга. Второй по значимости механизм износа — при соударении этих частиц с поверхностями. Так как взаимодействие происходит в коррозионной среде, то механизм

износа представляет собой сочетание коррозионного и механического воздействий: коррозионно-абразивный износ и коррозия—эрозия.

В настоящее время наиболее стойкими материалами в условиях работы установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) являются твердые сплавы. Из них изготавливают втулки промежуточных радиальных подшипников. В некоторых случаях их применяют для производства отдельных частей ступеней [1]. При поиске альтернативы твердым сплавам ориентируются прежде всего на твердость материала, так как ее превышение на 30 % по отношению к твердости абразива резко снижает скорости абразивного и эрозионного износов (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема взаимосвязи между скоростью износа и соотношением твердостей абразива и поверхности деталей [1]

Как в России, так и за рубежом прилагаются значительные усилия для разработки эффективных технологий получения покрытий [2–4]. Наиболее полно вопросы получения нанокристаллических покрытий изложены в обзоре [4]. В последнее время в нефтяной отрасли (при нефтедобыче и транспорте нефти) начинают опробовать алмазоподобные (АПП) и другие сверхтвердые покрытия [1, 6–11] на деталях из твердого сплава [1, 11], сталей [5–9] и карбида кремния [10].

Алмазоподобные покрытия имеют высокие твердость и износостойкость, однако их применение в УЭЦН сопряжено с рядом проблем, связанных с жесткими условиями эксплуатации: присутствием в рабочей среде воды, твердых абразивных частиц, других примесей, приводящих к отложениям солей на деталях насоса. Возможность образования солеотложений не позволяет делать малые зазоры в промежуточных радиальных подшипниках, в результате чего становится возможным попадание относительно крупных абразивных частиц в увеличенный зазор, что в условиях вибраций, изгибов корпуса насоса и вала может приводить к существенным по величине контактным усилиям при одновременном взаимодействии наиболее крупных абразивных частиц с обеими поверхностями втулок подшипника. Это обуславливает высокие требования к свойствам и качеству АПП для применения в УЭЦН.

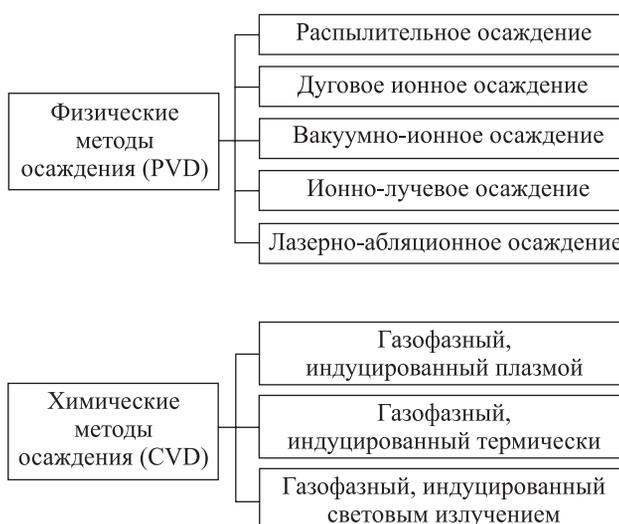
Целью настоящей статьи является обзор технологий получения АПП на сталях с точки зрения возможности их применения для упрочнения деталей установок электроцентробежных насосов.

## Методы получения и основные свойства АПП

Основные свойства АПП ( $ta-C$ ,  $a-C:H$ ,  $ta-C:H$ ) зависят от доли  $sp^3$ -связей и количества водорода в их составе [12] (табл. 1). Также значение имеют наличие примесей и структура покрытий [13]. Разнообразные технологии получения АПП сводятся к нескольким физическим и химическим методам (рис. 2) [14].

По мнению авторов [1], применительно к насосам интерес могут представлять 2 типа АПП:

- гидрогенизированные алмазоподобные покрытия  $a-C:H$ , твердость которых колеблется в пределах 10–30 ГПа;
- тетраэдрический аморфный углерод  $ta-C$ , который содержит значительные доли связей  $sp^3$ , что обеспечивает очень высокие показатели твер-



**Рис. 2.** Классификация методов осаждения АПП

**Таблица 1. Основные свойства АПП в сравнении с алмазом, графитом, фуллереном и стеклоуглеродом**

Покрытие	$sp^3$ , %	H, ат. %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость, ГПа
Алмаз	100	0	3,515	100
Графит	0	0	2,267	
$C_{60}$	0	0		
Стеклоуглерод	0	0	1,3–1,55	3
$ta-C$	80–88	0	3,1	80
$a-C:H$ (твердый)	40	30–40	1,6–2,2	10–20
$a-C:H$ (мягкий)	60	40–50	1,2–1,6	<10
$ta-C:H$	70	30	2,4	50

дости, сравнимые с алмазом. Они обычно имеют более высокую адгезию, чем алмазные, газофазные (CVD) и *a*-C:H-покрытия.

Успешное применение алмазоподобных покрытий на стальных деталях УЭЦН, требует учета влияния технологических параметров на такой показатель, как прочность связи АПП с подложкой, или адгезия. В настоящее время общепринятым методом ее оценки являются испытания царапанием алмазными пирамидками, в результате которых определяются величины предельной нормальной нагрузки ( $L_c$ ).

### Метод определения $L_c$

Настоящий обзор в основном ограничен систематизацией информации по влиянию состава, структуры и технологии получения алмазоподобных покрытий на предельные нагрузки ( $L_c$ ) в ходе испытаний царапанием и некоторыми аспектами, например такими, как влияние наличия воды в рабочей среде, которые позволяют выявить основные проблемы применения АПП в УЭЦН.

В табл. 2 сгруппированы данные о результатах испытаний царапанием алмазоподобных покрытий. Следует отметить, что результат зависит от особенностей методики испытаний, в частности от радиуса закругления острия алмазной пирамидки, с увеличением которого предельные нагрузки увеличиваются. Применяются разные способы фиксации начала (стадий) разрушения. Наиболее часто используется визуальная оценка значений  $L_c$ , а также фиксация по акустической

эмиссии или резкому возрастанию величины силы трения [15].

При визуальном определении стадий разрушения фиксируют следующие величины:

$L_{c1}$  — нагрузка, при которой имеет место когезивное разрушение (появляются трещины и отколы в объеме покрытия);

$L_{c2}$  — нагрузка, при которой происходит адгезивное разрушение (отрываются первые кусочки покрытия и становится видимой подложка);

$L_{c3}$  — нагрузка, при которой покрытие полностью удаляется из канала царапины.

Испытание проводят при увеличении нормальной нагрузки по дистанции, при этом фиксируются:

- величина нормальной силы, прижимающей индентор к поверхности;
- тангенциальная сила, т.е. сила трения;
- акустическая эмиссия;
- вертикальное перемещение индентора.

### Внутренние напряжения — причина ограничения толщины АПП

Главное использование АПП — защитные покрытия, причем из них предпочтительны «толстые». Однако толщину пленки нельзя увеличить без ухудшения свойств. Ограничения накладываю образующиеся в покрытии напряжения, которые ухудшают адгезию и в конечном итоге приводят к отслоению.

Пленка толщиной  $h$  будет отслаиваться, когда упругая энергия на единицу объема из-за напря-

Таблица 2. Критические нагрузки  $L_c$  для покрытий DLC на сталях и керметах

Подложка	Покрытие	Толщина покрытия, мкм	Твердость поверхности подложки	$L_{c1}$ , Н	$L_{c2}$ , Н	$R$ , мкм	Источник
Быстрорежущая сталь W18Cr4V	Ti/Ti-DLC				26,5	200	[37]
	Ti/AlTiN/Ti-DLC			38,2	47,8	200	[37]
Быстрорежущая сталь W18Cr4V	Ti/AlTiN/Ti-DLC			36	48	200	[38]
	<i>ta</i> -C	1,7–1,8	20–30 ГПа	42		200	[1]
WC–4,8%TaC–4,5%TiC/6%Co–1%Cr	<i>ta</i> -C	1,7–1,8	20–30 ГПа	~3		200	[1]
Нержавеющая сталь 440C	DLC	1,5		<1		15	[39]
Нержавеющая сталь 316	Cr/CrN/CrCN/CrC–W-DLC	2,6	153 HV	100		200	[40,41]
Сталь AISI 440C	Нанокристаллический алмаз	~1,7	57–58 HRC	5–6		25	[28]
Сталь SAE 6150	XTO (4 стадии)/DLC	~1,0	13 ГПа	121±6		8,8	[27]

жения  $\sigma$  превысит энергию, требующуюся для образования двух свежих поверхностей при отслоении [12]:

$$2\gamma > \frac{\sigma^2 h}{2E}, \quad (1)$$

или

$$h < \frac{4\gamma E}{\sigma^2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — поверхностная энергия, Дж/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  — напряжения, Па;  $h$  — толщина покрытия, м;  $E$  — модуль упругости, Па.

Эта зависимость устанавливает верхний предел толщины пленки, выше которой она отслаивается самопроизвольно. При воздействии на покрытие индентора или абразивных частиц на напряжения от внешней нагрузки накладываются остаточные напряжения в покрытии, и соответственно, разрушение происходит при меньших нагрузках.

По величине предельной нагрузки оценивают предельные напряжения, создаваемые индентором [1]:

$$\sigma_{сж} = \frac{0,15}{R} \left( \frac{L_c H_c}{H_s} \right)^{0,5} E_c^{0,3} E_s^{0,2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{сж}$  — критическое среднее напряжение сжатия в покрытии, Па;  $L_c$  — предельная нормальная нагрузка, Н;  $R$  — радиус индентора, м;  $H_c$ ,  $H_s$ ,  $E_c$ ,  $E_s$  — твердость и модуль упругости покрытия и подложки, Па.

Из уравнения (3) следует, что величина  $L_c$  пропорциональна  $R^2$ : чем меньше радиус, тем большие напряжения в покрытии создает индентор при одной и той же силе прижатия (надавливания).

Желательно, чтобы защитные покрытия имели высокую твердость, значительную толщину и минимальные напряжения, но эти требования противоречивы, так как напряжения, модуль Юнга и твердость пропорциональны друг другу. При повышении твердости до максимума соответственно снижается толщина слоя. Поэтому в большинстве работ толщина алмазоподобных и других сверхтвердых покрытий составляет величину от долей до нескольких микрометров (см. табл. 2). Вместе с тем в последнее время появляются сообщения о получении АПП толщиной до нескольких десятков микрометров.

## Стратегии, применяемые для увеличения толщины слоя АПП

Для увеличения толщины слоя используются различные стратегии [12]: увеличение адгезии между покрытием и подложкой; формирование градиентных негомогенных или ступенчатых по составу, а также многослойных структур. Во многих работах показано, что величина  $L_c$  растет при увеличении твердости подложки, что объясняется уменьшением ее деформации (рис. 3) [16].

Эффективность перечисленных методов отражается в примерах, приведенных в табл. 2. Есть данные, что достаточно высокие значения  $L_c$  достигаются при большой толщине покрытия [17]. Значительного увеличения толщины АПП авторы [17] добились введением атомов кремния, а в [18] — за счет мультислоистой структуры.

Все приемы по существу сводятся к повышению адгезии и снижению уровня внутренних напряжений или, иначе, напряжений роста, которые возникают в процессе получения покрытий вследствие того, что пленки осаждаются в неравновесных условиях [19]. В работах [20, 21] показано снижение внутренних напряжений в *ta*-С-покрытиях при отжиге. При этом повышение температуры отжига вплоть до 1100 °С не приводило к существенному уменьшению доли *sp*<sup>3</sup>-связей. Механизмы релаксации внутренних напряжений подробно рассмотрены в [22] на основании электронно-микроскопических исследований.

Основное направление повышения механических свойств АПП и других сверхтвердых покрытий на сталях — увеличение твердости поверхности подложек и прочности сцепления при помощи различных видов обработки. Чаще всего для этого используются: азотирование [23], нанесение слоев твердого хрома [24], напыление слоя WC—Co [25] с последующим нанесением сверхтвердого покрытия. Такие пленки получили название «дуплекс-покрытия».

В случае алмазоподобных покрытий *a*-C:H:Si обработка стальной подложки обеспечивает значительное увеличение твердости ее поверхности и повышение  $L_c$  [26]. Результат зависит от подготовки поверхности, параметров азотирования и осаждения, используемых прекурсоров кремния. Максимальная величина  $L_c = 19$  Н была достиг-

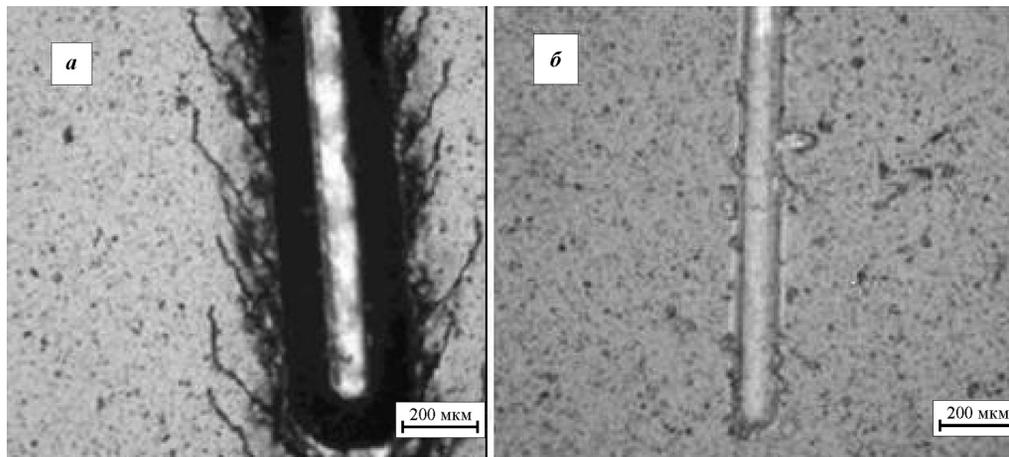


Рис. 3. Вид покрытий AlTiN на подложках из нержавеющей стали AISI 304 (а) и твердом сплаве (б) после испытания царапанием [16]

нута в режиме с температурой осаждения 400 °С и использованием прекурсора кремния HMDSO (гексаметилдисилоксан) при предварительном азотировании подложки из стали 42CrMo4 с образованием твердого слоя компаунда.

Высокие свойства АПП ( $L_c = 121$  Н при радиусе наконечника  $R = 8,8$  мкм) получены при более сложных видах обработки подложек, включающих на последнем этапе цементацию. Авторы [27] в качестве подложки использовали сталь SAE 6150, в состав которой входят, мас. %: 0,45–0,55 С, 0,65–0,9 Mn, <0,04 P, <0,04 S, 0,20–0,35 Si, 0,50–1,10 Cr, 0,1–0,15 V, и подвергали ее термической обработке — нормализации. Затем осуществляли 4 стадии термической (ТО) и химико-термической обработки (ХТО) по следующим режимам:

1) карбюризация в плазме смеси метана, водорода и азота при давлении  $P = 250$  МПа, соотношении скоростей расхода указанных газов, об. %: 5 : 15 : 80, температуре  $t = 475$  °С в течение 2 ч.

2) при тех же давлении и температуре соотношение в составе газовой смеси было 15 : 5 : 80, т.е. на этой стадии увеличено содержание метана за счет снижения количества водорода при сохранении доли азота; эта стадия длилась 1 ч;

3) в газовой смеси, состоящей из метана и водорода в соотношении 60 : 40, при  $P = 250$  МПа и  $t = 475$  °С и  $\tau = 0,5$  ч;

4) при  $P = 40$  МПа,  $t = 150$  °С и прежнем соотношении метан : водород = 60 : 40; длительность этой стадии 1 ч.

После последней стадии ХТО подложка обладала высокой микротвердостью поверхности

(~13 ГПа) при нагрузке на индентор микротвердомера 150 мН. Однако не только высокая твердость обеспечивает высокое значение  $L_c$  в данной работе. Атомная структура поверхностного слоя стали после такой обработки очень близка к структуре алмазоподобного покрытия, как это видно из рамановских спектров (рис. 4).

Последняя (4-я) стадия обработки, по мнению авторов [27], подобна образованию тонкого промежуточного алмазоподобного слоя.

Проблемы и последние достижения в получении покрытий из нанокристаллического алмаза обсуждаются в работе [28]. Такой вид покрытия при прямом нанесении на сталь имеет более высокую износостойкость по сравнению с АПП, но показав

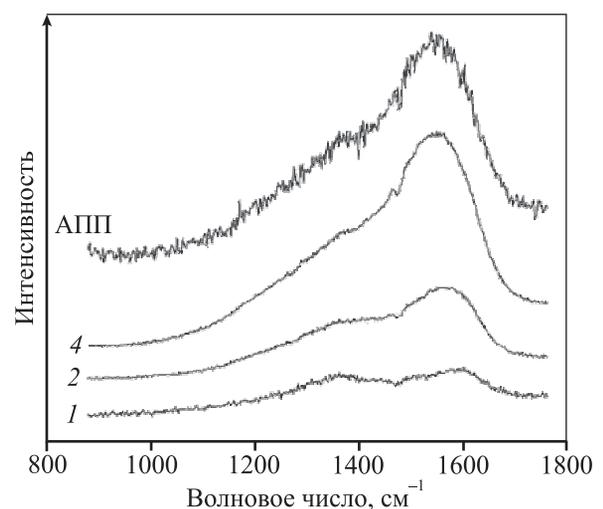


Рис. 4. Спектры Рамана с поверхности стали после последовательных 4 этапов обработки и алмазоподобного покрытия [27]

Описание стадий ТО и ХТО (1, 2, 4) приведено в тексте

тель  $L_c$  невелик: 5–6 Н при радиусе наконечника 200 мкм. Несмотря на то, что авторы [28] преодолели многие проблемы получения алмаза на стали, относительно низкая твердость подложки (57–58 HRC) привела к невысокому значению  $L_c$ .

### Влияние среды (воды) на работоспособность АПП

Оборудование УЭЦН работает в среде, в значительной степени состоящей из воды, поэтому особо следует отметить ее сильное влияние на механизм разрушения покрытий. Поскольку информации по влиянию воды на свойства покрытий мало [29, 30], рассмотрим этот вопрос, следуя работе [29], посвященной покрытию из оксида хрома. Воздействие воды проявляется через изменение энергий, образующихся при отслоении поверхностей, и соответствующее изменение работы адгезии  $W_A$  [29]:

$$W_A = \gamma_c + \gamma_s - \gamma_{cs}, \quad (4)$$

где  $\gamma_c$ ,  $\gamma_s$  и  $\gamma_{cs}$  — энергии поверхностей покрытия, подложки и межфазной поверхности соответственно, Дж/м<sup>2</sup>.

На воздухе и в воде энергии поверхностей ( $\gamma_c$ ,  $\gamma_s$ ) в случае АПП значительно отличаются, что приводит к существенной разнице в величине работы адгезии в этих случаях — соответственно 22 и 0,8 Дж/м<sup>2</sup> [30]. В результате при идентичности покрытия в воде происходит отслоение обширных его участков, в то время как на воздухе этого нет. Авторы [29, 30] приходят к выводу, что в случае, когда вода не может достичь поверхности, т.е. при нагрузках ниже предельных, изменения в адгезии покрытий практически незаметны.

Становится понятным влияние на результаты трибологических испытаний АПП в воде дефектов типа пор и каналов, через которые жидкая среда может попадать к границе между покрытием и подложкой. Так, в работе [31] показано, что в случае покрытий, полученных физическими методами осаждения (PVD), обычно допированных металлами, такими как W или Ti, заметного снижения износостойкости в воде (по сравнению с воздухом) не происходит, в отличие от CVD-покрытий. Дефекты и маленькие сквозные отверстия (pinholes) — главная причина адгезивного

износа АПП в водной среде [32]. Некоторые виды АПП, и особенно *ta*-C, могут сохранять высокую износостойкость в воде [33], и преимущество по этому показателю имеют покрытия на более твердых подложках [34–36].

### Заключение

Анализ литературных данных показывает, что основная причина разрушения алмазоподобных покрытий на деталях в водосодержащей среде при наличии абразивных частиц — это катастрофическое снижение адгезии при попадании воды на границу подложка—покрытие. Для достижения работоспособности АПП на стальных подложках в водо- и абразивосодержащих средах необходимо получение бездефектных покрытий с высокими показателями адгезии.

За последние годы достигнут значительный прогресс в понимании путей повышения адгезии, снижения внутренних напряжений, регулирования структуры и свойств АПП. Наилучшие АПП на стали по критерию  $L_c$  (нормальной предельной нагрузке) получены с использованием сложной многостадийной химико-термической обработки подложки, включающей на последнем этапе цементацию.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках финансирования проектной части государственного задания № 11.1913.2014/К.*

### Литература

1. Xie Y., Llewellyn R.J., Stiles D. // *Wear*. 2001. Vol. 250. P. 88–99.
2. Злобин С.Б., Батраев И.А., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 5. С. 20–24.
3. Лахоткин Ю.В., Кузьмин В.П., Душик В.В., Рыбкина Т.В. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 6. С. 9–15.
4. *Наноструктурные покрытия* / Под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона М.: Техносфера, 2011.
5. Lusk D., Gore M., Boardman W. et al. // *Diamond and Related Mater.* 2008. Vol. 17. P. 1613–1621.
6. Casserly T., Boinapally K., Oppus M. et al. / Investigation of DLC-Si Film Deposited Inside a 304SS Pipe Using a Novel Hollow Cathode Plasma Immersion Ion Processing Method // *Proceedings of the Society of Vacuum Coaters: 50-th An-*

- nual Technical Conf. Proceedings ( April 28—May 3, 2007). Louisville, KY, 2007. P. 59—62.
7. URL: [https://www.researchgate.net/publication/237296854\\_A\\_Novel\\_Corrosion\\_and\\_Abrasion\\_Resistant\\_Internal\\_Coating\\_Method\\_with\\_Improved\\_Adhesion\\_Using\\_Hollow\\_Cathode\\_PECVD\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/237296854_A_Novel_Corrosion_and_Abrasion_Resistant_Internal_Coating_Method_with_Improved_Adhesion_Using_Hollow_Cathode_PECVD_Technology). (Дата обращения 15.05.015).
  8. *Wei R.* Plasma Surface Engineering Research at SwRI and its Practical Applications for Extreme Environments // <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. (Дата обращения 18.05.15).
  9. *Wei R., Rincon C., Coulter K.E., Miller M.* // URL: <http://www.swri.org/3pubs/ttoday/Winter11/PDFs/Improving-SurfaceProperties.pdf>. (Дата обращения 08.05.15).
  10. *Fundis M., Knoch H.* Diamond-like carbon coatings — tribological possibilities and limitations in applications on sintered silicon carbide bearing and seal face // Proc. 14-th Inter. Pump Users Symp. (September 24—27, 2012). Houston, Texas, 1997. С. 93—98.
  11. *Xiang Yu, Yang Liu, Lei Ma et al.* // *Vacuum*. 2013. Vol. 94. P. 53—56.
  12. *Robertson J.* // *Mater. Sci. Eng.* 2002. Vol. 37. P. 129—281.
  13. *Де Хоссон Д.Т.М., Карвальо Н.Д.М., Пей Ю., Гальван Д.* // Наноструктурные покрытия / Под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. М.: Техносфера, 2011. С. 182—263.
  14. *Kouya Oohira.* Characteristics and Applications of DLC // URL: [http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR77\\_en\\_p090\\_095.pdf](http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR77_en_p090_095.pdf). (Дата обращения 08.05.15).
  15. *Chi-Lung Chang, Da-Yung Wang* // *Diamond and Related Mater.* 2001. Vol. 10. P. 1528—1534.
  16. *Podgursky V., Torp B., Traksmaa R.* et al. // *Mater. Sci. (Medziagotyra)*. 2005. Vol. 11, № 4. P. 352—355.
  17. *Forsich C., Heim D., Dipolt C., Müller T.* et al. // *Surface Coat. Technol.* 2012. Vol. 241, № 1. P. 86—92.
  18. *Birney R., Placido F.* Modified Diamond-Like Carbon Multilayer Coatings on Metallic Substrates Produced by Pulsed-DC Hollow Cathode PECVD // Proceedings of the Society of Vacuum Coaters: 55-th Annual Technical Conference Proceedings (April 28—May 3, 2012 ). Santa Clara, CA, P. 586—592.
  19. *Joost Vlassak.* Thin Film Mechanics // URL: <http://www.mrsec.harvard.edu/education/ap298r2004/Vlassak%20AP298%20presentation.pdf>. (Дата обращения 15.05.15).
  20. *Ferrari A.C., Rodil S.E., Robertson J., Milne W.I.* // *Diamond and Related Mater.* 2002. Vol. 11. P. 994—999.
  21. *Ferrari A.C., Kleinsorge B., Morrison N.A.* et al. // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85, № 10. P. 7191—7197.
  22. *Овидько И.А.* Наноструктурные покрытия / Под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. М.: Техносфера, 2011. С. 108—140.
  23. *Polok-Rubiniac M., Dobrzański L.A., Adamiak M.* // *J. Achievements in Mater. and Manufact. Eng.* 2007. Vol. 20, № 1-2. P. 279—282.
  24. *Benkahoul M., Robin P., Martinu L., Klemberg-Sapieha J.E.* // *Surface Coat. Technol.* 2009. Vol. 203. P. 934—940.
  25. *Bemporad E., Sebastiani M., Casadei F., Carassiti F.* // *Surface Coat. Technol.* 2007. Vol. 201. P. 7652—7662.
  26. *Forsich C., Heim D., Mueller T.* // *Surface Coat. Technol.* 2008. Vol. 203. P. 521—525.
  27. *Silva W.M., Trava-Airoldi V.J., Chung Y.W.* // *Surface Coat. Technol.* 2011. Vol. 205. P. 3703—3707.
  28. *Tsugawa K., Kawaki S., Ishihara M., Hasegaway M.* // *Jap. J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 51. P. 090122 1—6.
  29. *Pang X., Volinsky A.A., Gao K.* Water Effects on Adhesion and Wear Resistance of Chromium Oxide Coatings // URL: <http://eng.usf.edu/~volinsky/PangNACE08.pdf>. (Дата обращения 15.05.15).
  30. *Volinsky A.A., Waters P.* Novel adhesion test for environmentally assisted fracture in thin films // URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a456175.pdf>. (Дата обращения 15.05.15).
  31. *Drees D., Celis J.-P.* Tribocorrosion — Combined effects of wear and corrosion in aqueous environments // URL: <http://www.irg-woem.org/pdfs/15.pdf>. (Дата обращения 15.05.15).
  32. *Jin Woo Yi, Se Jun Park, Myoung-Woon Moon* et al. // *Appl. Surface Sci.* 2009. Vol. 255. P. 7005—7011.
  33. *Ronkainen H., Varjus S., Holmberg K.* // *Wear*. 2001. Vol. 249. P. 267—271.
  34. *Haque T., Ertas D., Ozekcin A.* et al. // *Wear*. 2013. Vol. 302, № 1—2. P. 882—889.
  35. *Luca Nobili, Luca Magagnin* // *Trans. Nonferrous Metal. Soc. China*. 2009. Vol. 19. P. 810—813.
  36. *Wu X., Ohana T., Nakamura T., Tanaka A.* // *Wear*. 2010. Vol. 268, № 1—2. P. 290—334.
  37. *Pang X., Yang H., Gao K.* et al. // *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519. P. 5353—5357.
  38. *Pang X., Yang H., Shi S.* et al. // *J. Mater. Res.* 2010. Vol. 25, № 11. P. 2159—2165.
  39. *Zhang S., Lam Bui X., Fu Y.* et al. // *Diamond and Related Mater.* 2004. Vol. 13. P. 867—871.
  40. *Zhi-qiang Fu, Cheng-biao Wang, Wei Zhang* et al. // *Mater. Design*. 2013. Vol. 51. P. 775—779.
  41. *Wen Yue, Song Wang, Zhiqiang Fu* et al. // *Surface Coatings Technol.* 2013. Vol. 218. P. 47—56.