

УДК 620.179.112+621.921.34:621.921.34–413:621.923.4

С. С. Соболев⁴, инженер, Е. Е. Ашкинази^{1,2}, А. Н. Соколов³, В. Г. Гаргин³, кандидаты технических наук; Н. Е. Ашкинази¹, А. А. Шульженко³, инженеры

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), г. Москва

³Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

⁴Российский государственный университет нефти и газа им. И.М.Губкина, г. Москва

АЛМАЗНЫЙ ГИБРИДНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ «ГИБРИДАЙТ». ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ И АБРАЗИВНОЙ СПОСОБНОСТИ

Проведено сравнительное исследование фрикционных свойств и абразивной способности образцов материалов гибридайт и АКТМ. Показано, что присутствие CVD-алмазной вставки армирует поликристаллический композит более твердой и износостойкой алмазной компонентой, что существенно повышает его абразивную способность и может быть рекомендовано для оснащения режущей части бурового инструмента в целях повышения его абразивной способности.

Ключевые слова: фрикционные свойства, абразивная способность, алмазный поликристалл, гибридайт.

Введение

В процессе эксплуатации породоразрушающий инструмент изнашивается, по достижении предельного износа становится непригодным и требует восстановления или замены.

Как известно [1], под износом понимается постепенное изменение формы и размеров детали и инструмента в процессе работы.

При оценке степени износа породоразрушающего инструмента обычно рассматривают вклад трех составляющих:

абразивный износ – изменение размеров и геометрии рабочих элементов породоразрушающего инструмента при движении по поверхности трения;

усталостный поверхностный износ – изменение размеров и геометрии рабочих элементов породоразрушающего инструмента, происходящее от многократных нагрузок и разгрузок в одних и тех же местах на поверхности инструмента в случае, когда фактические контактные напряжения в этих местах меньше предела прочности и даже не превышают предела упругости материала;

местное разрушение – разрушение на поверхности инструмента в виде царапин, образующихся от местного разрыва молекулярных связей в случае, когда фактическое контактное напряжение равно пределу прочности материала или превышает его.

Особенно важен в алмазном бурении износ, связанный с действием на алмаз и матрицу частиц разрушенной породы. По достижении породоразрушающим инструментом предельного износа он должен быть извлечен из скважины и заменен новым инструментом.

В этой связи актуальной задачей является разработка породоразрушающего инструмента с повышенной износостойкостью рабочих элементов, что, во-первых, позволит повысить стойкость породоразрушающего инструмента в целом и, во-вторых, снизить продолжительность вспомогательных операций. В результате повысится рентабельность проведения буровых работ.

К наиболее перспективным материалам с повышенной износостойкостью для оснащения бурового инструмента относятся алмазные композиционные поликристаллические гибридные материалы [2], в частности, разработанный коллективами Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины и Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН на основе армирования алмазным композиционного термостойкого материала (АКТМ) поликристаллическим алмазом, полученным методом осаждения из газовой фазы (CVD-алмазом), гибридный алмазный композиционный поликристаллический материал, которому присвоена торговая марка «Гибридайт» [3–5].

Цель настоящей работы – осуществить сравнительное исследование фрикционных свойств и абразивной способности образцов и материалов «Гибридайт» и АКТМ.

Материалы и методики исследований

Образцы гибридаита и АКТМ были получены в соответствии с методикой, описанной в [6], особенностью которой является двухстадийное спекание соответствующей шихты при давлении 8 ГПа. Испытания проводили в два этапа.

1. Трибологические испытания по дисковому образцу из карбида кремния с использованием трибологической испытательной машины Т-10 (Польша) по схеме диск/палец [7].

2. Трибологические испытания АКТМ и гибридаита (АКТМ+СVD) на трибометре CETR UMT-2 (США) с использованием контр-тела в форме шара (схема образец/палец-шар).

На первом этапе испытаний сравнивали фрикционные свойства и абразивную способность двух образцов одинаковых размеров: диаметром 3,7 мм и высотой 4 мм.

Принципиальная схема трибометра Т-10 показана на рис. 1.

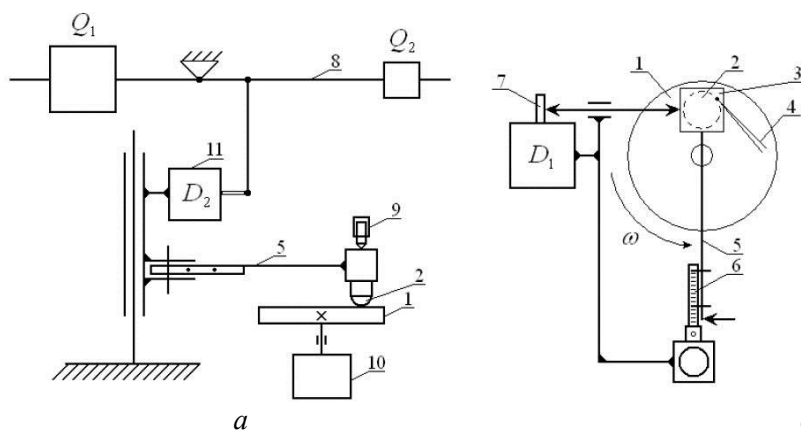


Рис. 1. Принципиальная схема трибометра Т-10 (а – вид с боку; б – вид сверху): 1 – дисковый образец из карбида кремния; 2 – исследуемый образец; 3 – цанговый зажим; 4 – терморара; 5 – поворотный кронштейн; 6 – микровинт; 7, 11 – датчик давления; 8 – рычажно-грузовое устройство; 9 – датчик перемещения; 10 – двигатель

В процессе эксперимента исследуемый образец прижимали к торцевой поверхности дискового образца из карбида кремния силой P , которую создавали с помощью рычажного устройства 8 и грузов

Q_1 и Q_2 . Силу прижатия индентора 2 к образцу 1 измеряется датчиком 12. При вращении образца 1 сила трения увлекает образец 2 и вместе с ним поворотный кронштейн 5, который упирается в датчик 7 для измерения силы трения $F_{тр}$ на контакте. Коэффициент трения для исследуемой пары определи по соотношению $f_{тр} = F_{тр}/P$. Условия опыта варьировали в следующих пределах: нагрузка на «палец» $P = 15-50$ Н; скорость вращения диска постоянная $n = 50$ об./мин; радиус дорожки скольжения – 20 мм. В течение всего исследования вели непрерывную запись значений коэффициента трения $f_{тр}$. Двигатель трибомашины автоматически останавливался по истечении установленного времени либо заданной дистанции скольжения (количество оборотов диска).

Для регистрации эволюции поверхности дорожки скольжения после каждого опыта проводили ее профилометрирование на профилографе S8P фирмы «Mahr» (Германия).

Поверхность диска SiC после трения алмазными композитами проводили с помощью

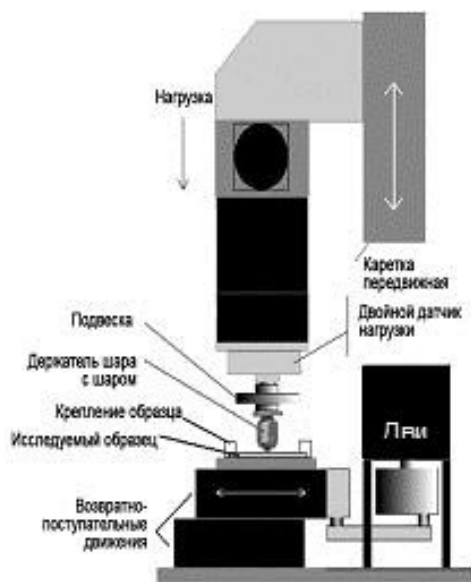


Рис. 2. Устройство и схема трибометра «CETR UMT-2»

микроинтерферометра белого света фирмы «ZYGO» марки «New-View 5000».

Сравнение абразивной способности двух различных зон одного образца: АКТМ и АКТМ со вставкой CVD-алмаза проводили с использованием трибометра «CETR UMT-2», принципиальная схема работы которого (крепление образца, подача нагрузки, возвратно-поступательные движения) показана на рис. 2.

Трибометр «CETR UMT-2» позволяет испытывать образцы на трение при контактной нагрузке 1–100 Н со скоростью продольного перемещения образцов 0,001–1 мм/с в условиях поперечной вибрации с частотой до 60 Гц и амплитудой до 25 мм в воде и на воздухе при температуре до 350 °С. В процессе эксперимента испытуемый образец крепили на подвижной подложке, совершающей возвратно-поступательные движения. В специальный держатель устанавливали контр-тело (шар), которое под нагрузкой прижималось к образцу и истирало его в процессе испытания. По достижении заданного количества циклов двигатель автоматически отключался. Абразивную способность двух зон определялась по износу контр-тела (шара).

Результаты исследований и их обсуждение

Шероховатость и профиль исходной поверхности диска SiC на первом этапе испытания показана на рис. 3.

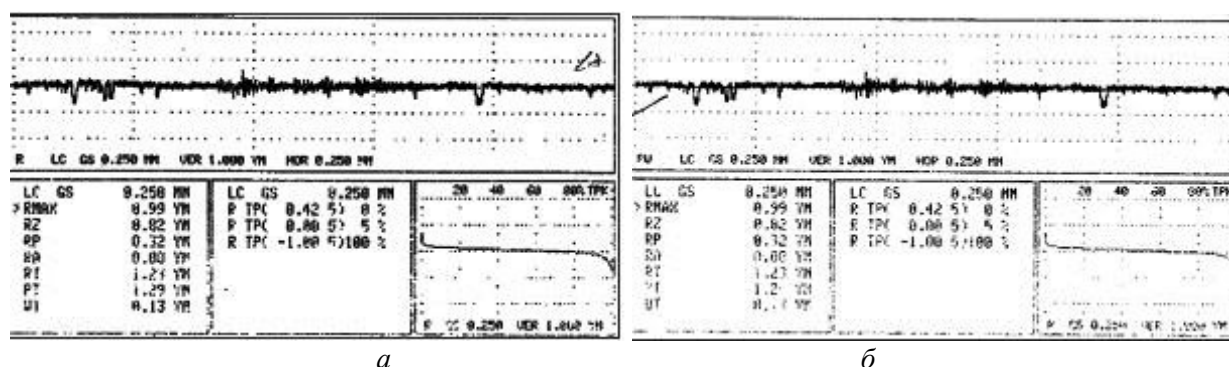


Рис. 3. Шероховатость (а) и профиль исходной поверхности (б) диска SiC

Как видим по данным рис. 3, рельеф и профиль носят регулярный характер.

Трибологические испытания образца АКТМ по диску SiC проводили при следующих параметрах эксперимента: нагрузке $Q = 20$ Н; $n = 50$ об./мин; радиусе от центра вращения диска $r = 20$ мм; скорости скольжения $V_{ск} = 0,1$ м/с; диаметре пальца – 4 мм. Осциллограмма зависимости коэффициента трения от времени показана на рис.4.

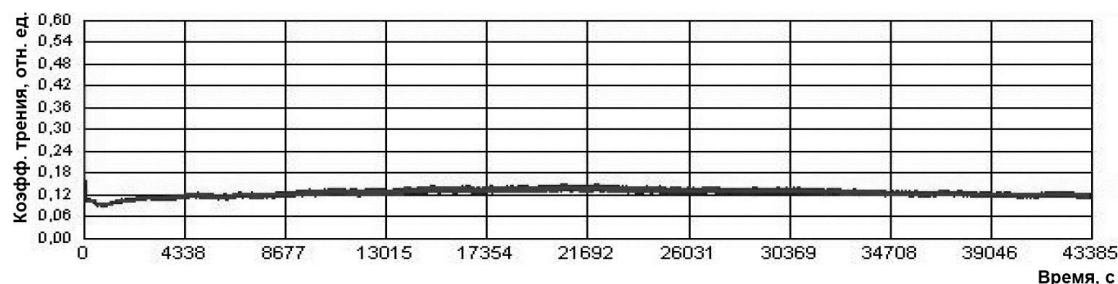


Рис. 4. Осциллограмма зависимости коэффициента трения от времени при трибоиспытаниях АКТМ по диску SiC

Как видно на рис. 4, начиная с 60-й мин образец выходит на режим нормального изнашивания, о чем свидетельствует выравнивание коэффициента трения. Это означает также, что с этой минуты образец работал в режиме равновесного изнашивания, т. е. микрорельеф, образующийся на образце, имел конформно стабильное воспроизводство до окончания испытания.

Шероховатость и профиль поверхности диска SiC, сформировавшиеся при трибоиспытании АКТМ, показаны на рис. 5.

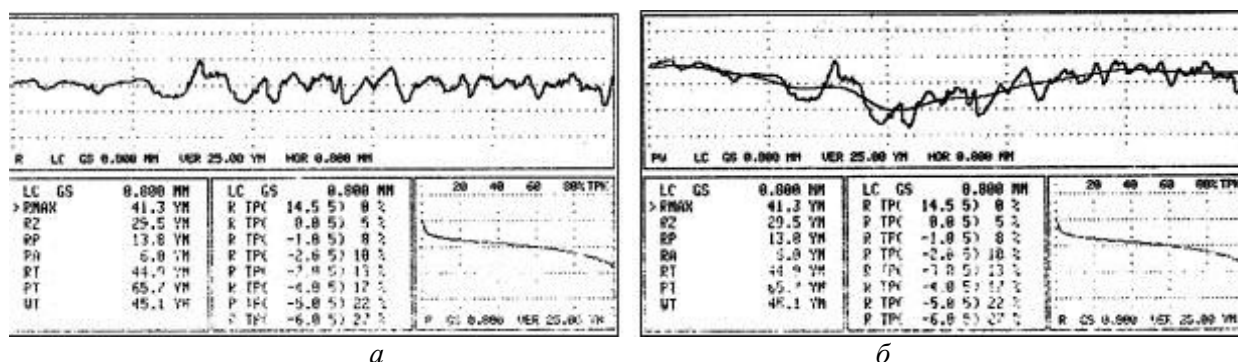


Рис. 5. Шероховатость (а) и профиль (б) поверхности диска SiC при трибоиспытаниях АКТМ

Скорость съема при испытаниях АКТМ составляла $V_{актм} = 0,086$ мг/ч. Трибологическое исследование свойств образца гибридаита по диску SiC включали следующие этапы. Первый этап испытания проходил при следующих условиях: радиус от центра вращения диска $r = 20$ мм; $n = 50$ об./мин; нормальная нагрузка $Q = 15$ Н. Общее время испытания – 30 мин, глубина врезания CVD-вставки составила ~16 мкм. Полученная на первом этапе осциллограмма зависимости коэффициента трения от времени показана на рис.6, а шероховатость и профиль поверхности диска SiC, сформировавшиеся на первом этапе трибоиспытания гибридаита – на рис. 7.

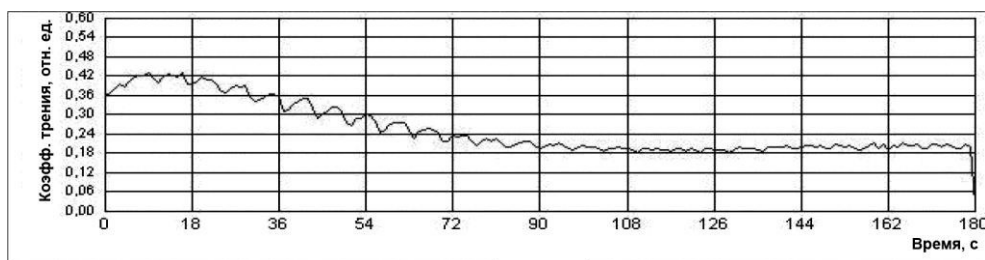


Рис. 6. Осциллограмма зависимости коэффициента трения от времени, полученная на первом этапе трибоиспытания гибридаита по диску SiC

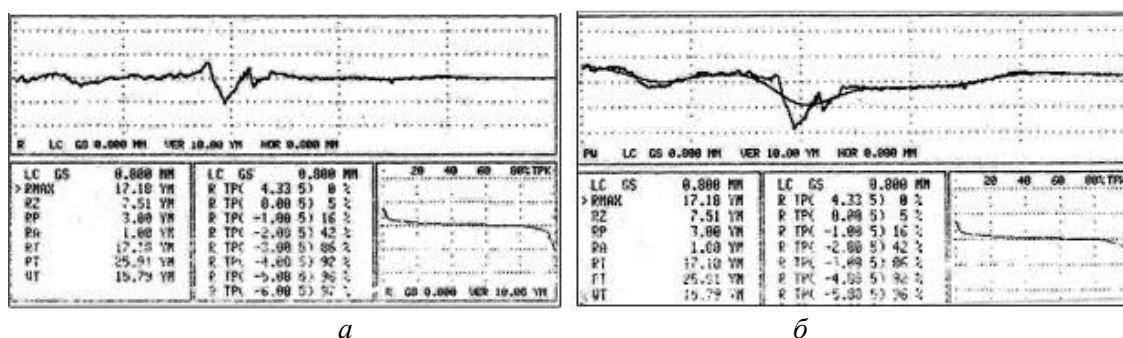


Рис. 7. Шероховатость (а) и профиль (б) поверхности диска SiC на первом этапе трибоиспытания гибридаита

Как следует из данных рис. 6, в течение 90 с коэффициент трения уменьшился с 0,42 до 0,24, после чего выравнялся и образец работал в режиме равновесного изнашивания.

На втором этапе испытания нормальная нагрузка составляла $Q = 15$ Н, на третьем и четвертом этапах $Q = 50$ Н. Во всех случаях время испытания не изменялось и составляло 30 мин.

Полученная на четвертом этапе осциллограмма зависимости коэффициента трения от времени показана на рис.8, а шероховатость и профиль поверхности диска SiC, сформировавшиеся на этом этапе трибоиспытания гибридайта – на рис. 9.

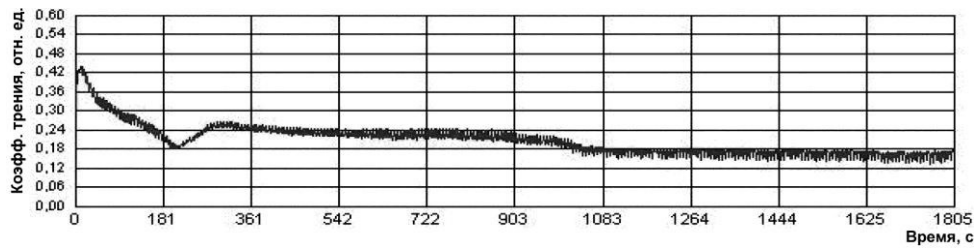
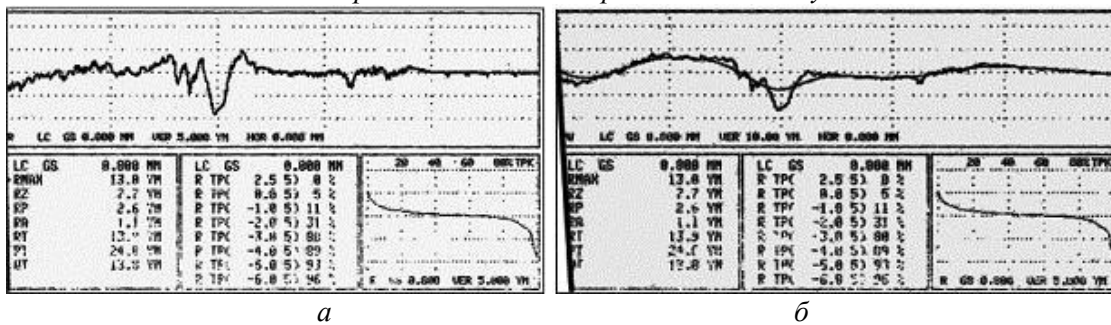


Рис. 8. Осциллограмма зависимости коэффициента трения от времени, полученная на четвертом этапе трибоиспытания гибридайта по диску SiC



а

б

Рис. 9. Шероховатость (а) и профиль (б) поверхности диска SiC на четвертом этапе трибоиспытания гибридайта

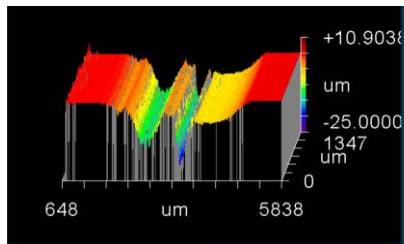


Рис. 10. Трехмерное изображение дорожки результирующего износа диска из SiC при трении алмазных композитов АКТМ и «Гибридайт»

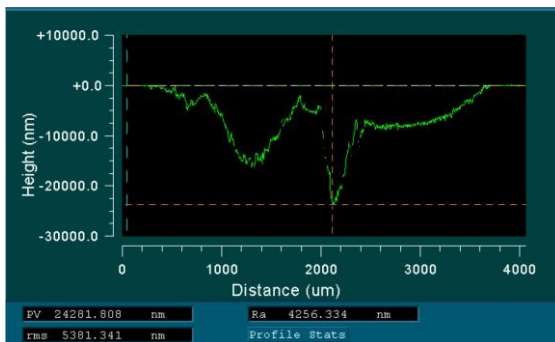


Рис. 11. Профиль дорожки результирующего износа диска из SiC при трении алмазных композитов АКТМ (глубина канавки 8 мкм) и «Гибридайт» (глубина канавки 23 мкм)

Скорость съема при испытании гибридайта составляла $V_{\text{гибридайт}} = 20,5$ мг/ч. Как видно на рис. 8, на этом этапе в изменении коэффициента трения наблюдалось несколько характерных участков. За первые примерно 180 с коэффициент трения резко уменьшился с 0,42 до 0,18. В течение следующих 90 с он увеличился до 0,24, далее в течение 13,5 мин уменьшился до 0,24, после этого выравнивался и образец гибридайта далее работал в режиме равновесного изнашивания.

Результаты анализа поверхности диска из SiC после трения алмазными композитами, полученные с помощью микроинтерферометра белого света «ZYGO» марки «New-View 5000» показаны на рис. 10 и 11.

Таким образом, из приведенных данных следует, что по абразивной способности (скорости съема, мг/ч) при сухом трении скольжения по диску из карбида

кремния гибридайт ($V_{\text{гибридайт}} = 20,5$ мг/час) значительно превосходит алмазный композиционный термостойкий материал АКТМ ($V_{\text{АКТМ}} = 0,086$ мг/ч). Коэффициент трения при сухом трении скольжения с карбидом кремния у гибридайта ($f_{\text{гибридайт}} = 0,42-0,18$) также существенно выше, чем у АКТМ ($f_{\text{АКТМ}} = 0,10-0,12$).

Выводы

Выполнены испытания абразивной способности гибридного алмазного композита «Гибридайт» с использованием сухого трения скольжения по дисковому образцу из карбида кремния (SiC) по схеме диск/палец.

Установлены коэффициенты трения скольжения для гибридайта и АКТМ по дисковому образцу из карбида кремния ($f_{\text{гибридайт}} = 0,42-0,18$, для АКТМ $f_{\text{АКТМ}} = 0,10-0,12$), обеспечивающие скорость съема при данных условиях испытания соответственно 20,5 и 0,086 мг/ч.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что присутствие CVD алмазной вставки, которая в результате НРНТ спекания армирует поликристаллический композит более твердой и износостойкой алмазной компонентой, позволяет существенно повысить абразивную способность композита, что позволяет его рекомендовать для оснащения режущей части бурового инструмента с целью повышения его абразивной способности.

Проведено порівняльне дослідження фрикційних властивостей і абразивної здатності зразків матеріалів гібридайт і АКТМ. Показано, що присутність CVD-алмазної вставки армує полікристалічний композит більш твердою і зносостійкою алмазною компонентою, що істотно підвищує його абразивну здатність і може бути рекомендовано для оснащення ріжучої частини бурового інструменту з метою підвищення його абразивної здатності.

Ключові слова: фрикційні властивості, абразивна здатність, алмазний полікристал, гібридайт.

A comparative study of frictional properties and abrasion ability samples of materials of gibridayt and AKTM has been carried out. It is shown that the presence of CVD-diamond polycrystalline composite insert reinforces the more solid and wear-resistant diamond component, which significantly increases its abrasive capacity and can be recommended to equip the cutting part of the drilling tool in order to enhance its abrasive capacity.

Key words: frictional properties, abrasion ability, polycrystalline diamond, gibridayt.

Литература

1. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. Учебник для вузов. 4-е издание перераб. и доп. – М: Недра, 1986. – 208 с.
2. Эффективность разрушения горных пород элементами из гибридного алмазного поликристаллического материала / А. А. Шульженко, Р. К. Богданов, А. П. Загора и др // Инструментальный світ. – 2012. – № 1. – С. 8–11.
3. Патент № 89732 Україна МПК С04 В 35/00. Надтвердий матеріал / О. О. Шульженко, О. М. Соколов, В. Г. Гаргін та інш. – Опубл. 25.02.10, Бюл. № 4.
4. Патент № 2413699 Россия МПК С04 В 35/528, С04 В 35/5835. Сверхтвердый материал / Е. Е. Ашкинази, В. Г. Ральченко, В. И. Конов и др. – Опубл. 10.03.11, Бюл. № 7.
5. Свідोцтво України на знак для товарів і послуг № 158183. – Гібридайт. – Опубл. 10.07.12, Бюл. № 13.
6. Новый гибридный ультратвердый материал / А. А. Шульженко, Е. Е. Ашкинази, А. Н. Соколов и др. // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 5. – С. 3–14.
7. В. Ф. Безъязычный, М. Щерек, А. Н. Сутягин. Проведение экспериментальных исследований образцов, выполненных из материала ЭП 612, на машине трения Т-11 // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева. – 2013. – № 1. – С. 84–90.
8. Rippling on wear scar surfaces of nanocrystalline diamond films after reciprocating sliding against ceramic balls / V. Podgursky, T. Hantschel, A. Bogatov at al. // Tribology Letters. – 2014. – № 55. – С. 3. – Р. 493–503.

Поступила 30.05.14