

**В. Ю. Долматов** (г. Санкт-Петербург, Россия)

### **Детонационные наноалмазы в маслах и смазках**

*Изложены основные результаты исследований возможности использования детонационных наноалмазов и их алмазосодержащей шихты (полупродукт синтеза наноалмазов) в качестве высокоэффективных антифрикционных и противоизносных добавок в масляные композиции. Показана эффективность применения указанных продуктов: ресурс инструментов и деталей увеличивается в 1,5—4,0 раза и рост предельных нагрузок на пару трения — в 4 раза.*

**Ключевые слова:** детонационные наноалмазы, алмазосодержащая шихта, антифрикционные и противоизносные добавки, масляные композиции.

Широко известны смазочные композиции, в которых в качестве антифрикционных добавок используют твердые материалы, в частности, порошки металлов, графита, классических алмазов, соединения молибдена. Из металлов широко применяют порошки меди, олова, свинца, серебра и бронзы [1—4]. Очень часто используют в качестве присадок порошки графита, дисульфидов молибдена и вольфрама [5, 6]. Анализ литературных данных дает основание для следующих выводов: наилучшими антифрикционными свойствами обладают порошки меди, серебра и дисульфида молибдена; максимальная концентрация порошков в масле — не более 5 %<sup>\*</sup>; оптимальные размеры порошков — не менее 1 мкм. Использование этих добавок позволяет реализовать полиграничный режим трения, что обеспечивает снижение коэффициента трения и снижение износа, повышает предельные нагрузки в узлах трения. Однако применение широко известных композиций ограничено в силу низких реологических и антикоррозионных свойств, а также седиментационной устойчивости. В то же время, эксплуатационные свойства могут быть улучшены за счет подбора новых антифрикционных добавок и функциональных присадок.

Наноразмерность частиц детонационного алмаза и их округлая форма делают их очень привлекательными для антифрикционных и противоизносных смазочных композиций различного рода [7—10]. Преимущества детонационных наноалмазов (ДНА) как модификатора трения перед другими типами веществ такого рода заключаются в следующем:

- эффективность при очень низких концентрациях в базовом масле;
- совместимость с различными видами синтетических и минеральных масел;
- экологическая безопасность углеродной добавки в масла по сравнению с металлическими или фторуглеродными частицами и веществами.

---

<sup>\*</sup> Здесь и далее все составы приведены в % (по массе).

Это создает необходимые предпосылки к широкому внедрению ДНА-содержащих присадок.

Наличие большого количества сверхмалых графитоподобных частиц и наноалмаза в алмазосодержащей шихте (АШ) изменяет свойства смазочной пленки и характер взаимодействия поверхностей трения. Концентрация частиц в жидкости может достигать  $10^{14}$  в  $1 \text{ см}^3$  и  $10^8$ — $10^9$  в монослое площадью  $1 \text{ см}^2$ , расстояние между отдельными фрактальными агрегатами будет составлять 0,1—0,5 мкм [11]. Увеличивается вязкость жидкости, прочной смазочной пленки и, как следствие, несущая способность трибосопряжения.

ДНА, составляющие ~ 50 % в АШ и обладающие определенной режущей способностью в режиме субмикрорезания, играют особо активную роль в процессе приработки и “залечивания” микродефектов сопрягаемых поверхностей, в том числе и вновь образованных. Этот процесс практически заканчивается при достижении фактической площади контакта, при которой реализуется полужидкостный или жидкостный режим смазки.

Цель авторов работы [12] состояла в создании смазочной композиции с твердым модификатором трения, которая обладала бы высокими антифрикционными, противоизносными и противозадирными свойствами, а также повышенной коллоидной и седиментационной стабильностью при улучшенных приработочных свойствах и малом содержании в композиции твердой фазы. Авторы предложили смазочную композицию, состоящую из масляной основы и АШ, причем заявленный состав был таким: неабразивный алмаз (ДНА) — 2,0—99,0 % и графит — 1,0—98,0 %. Соотношение компонентов: кластерный углерод (АШ) — 0,01—1,0 %, масляная основа — остальное.

В качестве основы смазочной композиции с АШ можно использовать минеральные или синтетические смазочные масла, смазочно-охлаждающие жидкости. Основа может быть сложной по составу и содержать необходимые функциональные добавки, обеспечивающие стойкость к окислению, устойчивость к пенообразованию, моюще-диспергирующие, антикоррозионные и другие свойства.

Коагуляционная устойчивость кластерного углерода в масляной основе обеспечивается тем, что размер энергетически равновесных фрактальных углеродных кластеров не превышает 30—60 нм. Это исключает расслоение смазочных композиций в течение длительного (свыше шести месяцев) времени.

Механизмы действия углеродных кластеров в смазочной композиции проявляются в нескольких направлениях, обеспечивающих ее эффективность, а именно:

— углеродные кластеры, имея малые размеры, насыщают поверхности трения, заполняя неоднородности на них и создавая новые (ювенильные) поверхности трения; при этом уменьшаются граничное трение и износ, особенно при больших нагрузках и дефиците смазочного материала, а также исключается схватывание и образование задиров на поверхностях трения;

— углеродные кластеры обуславливают повышение вязкости смазочной композиции в тонких пленках за счет дисперсного структурирования, при этом возрастает динамическая прочность пленки, исключается ее “хрупкое” растрескивание при высоких скоростях деформирования вследствие обрыва трещин на кластерах; уменьшаются потери масла от утечек через зазоры и уплотнения;

— углеродные кластеры обеспечивают снижение вязкости смазочной композиции при низких температурах вследствие снижения порога стеклова-

ния дисперсно-наполненной среды, и как следствие, имеет место расширение на 5—10 °С (по нижнему пределу) температурного диапазона использования смазочных композиций;

— углеродные кластеры, благодаря их высокой активности, адсорбируют смолы, образующиеся в процессе окисления масла, и исключают их осаждение на рабочих поверхностях;

— углеродные кластеры обеспечивают эффект последействия (свыше 60 ч) после замены смазочной композиции на масло-основу. Этот эффект связан с прочным механическим, адсорбционным и диффузионным закреплением углеродных кластеров на поверхностях трения;

— кластерные неабразивные алмазы при больших нагрузках и максимальном вытеснении жидкой фазы между поверхностями трения работают как микроподшипники качения, что обеспечивает рост предельных нагрузок, которые выдерживает пара трения без схватывания; так, на паре сталь—бронза нагрузка выросла с 16 до 72 МПа;

— кластерные алмазы в зоне трения благодаря их высокой твердости воздействуют на поверхности трения и на кластеры графита, чем обеспечивают их механо-химическую активацию и улучшение адсорбции масляной пленки.

Содержание в смазочной композиции с твердым модификатором трения кластерного углерода зависит от характера и режима работы устройства (машины, механизма, узла), в котором применяется эта смазочная композиция. Так, для смазывания тяжело нагруженных узлов преимущественно с большими поверхностями скольжения оно составляет 0,3—1,0 % [12].

Дальнейшее увеличение его содержания не приводит к улучшению служебных свойств смазочной композиции и, как правило, ведет к нарушению коагуляционной устойчивости дисперсии в низковязких маслах. Для средне-нагруженных механизмов, например, двигателей внутреннего сгорания (карбюраторных и дизельных), концентрация кластерного углерода в смазочной композиции составляет 0,01—0,3 % [12]. Такая концентрация обеспечивает оптимальный эффект, снижая мощность трения и расход топлива, повышая компрессию и динамические характеристики.

Для малонагруженных механизмов, например, металлообрабатывающих станков с циркуляционными системами смазки, содержание кластерного углерода в смазочных композициях составляет 0,01—0,15 %. При содержании углеродных кластеров меньше 0,01 % не отмечается существенного изменения служебных свойств смазочной композиции.

Использование смазочной композиции с АШ позволяет:

— существенно улучшить условия обкатки двигателей внутреннего сгорания и других машин и механизмов за счет устранения возможностей задира и заедания поверхностей трения; ускорить процесс выхода механизмов на номинальные режимы, а поскольку при этом обеспечивается снижение износа, то происходит увеличение ресурса;

— обеспечить работу прецизионных металлообрабатывающих станков, снизить расход дорогостоящих масел;

— сократить расход топлива и смазок, повысить мощность дизельных и карбюраторных двигателей внутреннего сгорания; повысить их динамические характеристики, улучшить запуск и снизить уровень шума.

Способ получения смазочной композиции с твердым модификатором трения достаточно прост в технологическом исполнении и осуществляется следующим образом. Кластерный углерод, получаемый по известной технологии, например, детонационным синтезом, обезвоживают путем вакуумной

сушки и в требуемых количествах загружают в емкость предварительного смешения, куда вводят и масляную основу, например, минеральное масло. После тщательного перемешивания смесь с помощью насосов продавливают через сетчатые фильтры и магнитные сепараторы и затем через устройства окончательного диспергирования, например, дезинтеграторы, акустические (ультразвуковые) смесители или мельницы, с последующим фильтрованием через фильтры тонкой очистки для удаления крупных включений и примесей.

Испытания моторных масел (АС-8, М-10Г, Мб<sub>3</sub>-10Г, Россия) показали, что наименьшее значение момента трения приходится на масло с содержанием 0,5—1,0 % АШ [13]. Несущая способность моторных масел с присадкой АШ увеличивается с ростом концентрации порошка в масле до 1 %. Дальнейшее повышение концентрации снижает несущую способность масел. Для масел АС-8 и М-10Г падение несущей способности существенное. Объяснить такое поведение масел можно тем, что при значительных концентрациях АШ происходит нарушение сплошности масляного слоя из-за нагрева масла до высоких температур.

В трансмиссионных маслах (ТСП-10, ТАД-17 и ТАП-15В, Россия) минимальное значение коэффициента трения также приходится на масло с содержанием 0,5—1,0 % АШ. Причем с ростом концентрации АШ до 0,5 % температура в зоне трения образцов заметно (на 10—20 град) снижается. При больших концентрациях АШ вновь наблюдается рост температуры, что объясняется снижением несущей способности масел при концентрациях порошка более 1 %.

Рассмотрим действие АШ с позиций адгезионного и механического подходов к проблеме износа. Углерод, находящийся в АШ, в обычном состоянии инертен и не вступает в реакции с металлом. Для инициирования адгезионного действия углерода необходимы температура, давление и наличие химически активных веществ. При трении в местах контакта поверхностей возникают высокие температуры. Наличие углерода и химически активных веществ приводит к насыщению поверхностных слоев атомарным углеродом, т. е. к образованию вторичных структур (аустенита, мартенсита, белых зон). Величина удельной поверхностной энергии снижается, уменьшается и адгезионная составляющая трения. В результате снижается коэффициент трения.

Оставшаяся часть АШ оказывает механическое действие на процесс трения материалов. Действие механической составляющей на процесс трения неоднозначно.

Во-первых, ультрадисперсные частицы заполняют микровпадины трущейся поверхности, тем самым повышая адгезионную способность смазки за счет увеличения фактической площади контакта. Для разрыва смазочной пленки требуются большие усилия.

Во-вторых, происходит частичное “залечивание” микротрещин частицами малого размера. Удельная поверхностная энергия становится меньше, уменьшая при этом адгезионную составляющую.

В-третьих, свободные частицы порошка АШ образуют несущий слой смазки более высокой вязкости и обладающий большим пределом прочности смазочного слоя.

В-четвертых, наличие твердых частиц в смазке приводит к образованию на поверхности металла защитного слоя, препятствующего адгезионному схватыванию.

Время обкатки двигателей внутреннего сгорания со смазочной композицией на основе АШ может быть сокращено с 60 до 5,5 ч, износ деталей ци-

линдропоршневой группы уменьшается в 1,5—2,5 раза при снижении внутреннего трения двигателя на 25—30 %, компрессия в цилиндрах двигателей увеличивается на 10—17 %. Оптимальное содержание АШ в смазочной композиции составляет 0,02—0,04 %.

Установлено, что отсутствует отрицательное воздействие присадки АШ на эксплуатационные свойства моторных масел, не снижается термоокислительная стабильность, не повышается коррозионность по отношению к цветным металлам и сплавам, улучшаются антифрикционные и противоизносные характеристики масел [13—15].

Отмечено повышение мощности двигателя при использовании присадки АШ на 4—8 %, снижение удельного расхода топлива на 3—6 % и уменьшение температуры выхлопных газов на 2—9 %.

Использование АШ для модифицирования промышленных и трансмиссионных масел снижает коэффициент трения в передачах и механизмах на 20—30 %, износ поверхностей трения — в 2,0—2,5 раза, улучшает плавность перемещения узлов, снижает шум передач.

В таблице приведены некоторые характеристики смазочных алмазосодержащих композиций и эффект от их использования.

#### **Характеристики смазочных алмазосодержащих композиций и эффект от их использования**

Содержание ДНА, %	0,01—0,3
Концентрация частиц в 1 см <sup>3</sup>	~ 10 <sup>14</sup>
Снижение температуры в зоне контакта, %	16—20
Снижение коэффициента трения, %	20—30
Увеличение предельных нагрузок пары трения сталь—бронза, МПа	с 16 до 72 (в ~ 4 раза)
Уменьшение износа сопряженных деталей, <i>n</i> раз	<i>n</i> = 1,5—3,0
Двигатели внутреннего сгорания	
Уменьшение времени обкатки, <i>m</i> раз	<i>m</i> = 10—12
Снижение расхода топлива, %	3—6
Увеличение мощности, %	4—8
Увеличение компрессии в цилиндрах, %	10—17
Смазочно-охлаждающие технологические среды	
Снижение момента резания, %	20—30
Увеличение ресурса инструмента, <i>p</i> раз	<i>p</i> = 1,5—4,0

В пластичных смазках АШ или ДНА вводят в состав базового масла непосредственно или через промежуточную среду и они могут в зависимости от применяемой технологии участвовать в формировании структурного каркаса. В подобных смазках АШ также снижает коэффициент трения на 20—30 %, износ пар трения — в 1,3—3,0 раза, увеличивает несущую способность стыков.

Существенно влияние АШ на большинство структурно-механических и эксплуатационных характеристик практически всех типов смазочных материалов. В консервационных смазках уменьшается химическая и электрохимическая коррозия металла за счет уменьшения или отказа от многих присадок, являющихся, как правило, коррозионно-агрессивными веществами. В уплотнительных и резьбовых смазках повышается герметичность соедине-

ний, уменьшается коррозия контактных поверхностей, стабилизируются и уменьшаются усилия на сдвиг, величина крутящего момента.

Для операций механической обработки резанием разработаны смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) на основе минеральных масел, в состав которых введены АШ, хлорсульфидированный жир и серосодержащий полиизобутилен [16—18]. Эти СОТС оказались эффективными при ручном и машинном резбонарезании, сверлении отверстий, шлифовании ферритов и др. Применение СОТС с АШ увеличивает срок службы инструмента в 1,5—4,0 раза, улучшает процесс резания за счет снижения сил резания, позволяет отказаться от некоторых СОТС (например, сульфозрезола и олеиновой кислоты), загрязняющих окружающую среду и вредных для здоровья работающих.

Правильный подбор содержания компонентов СОТС и АШ позволяет повысить показатель прирабатываемости поверхностей трения в  $\sim 8$  раз (по сравнению с приработкой в чистом масле) [16, 19].

Авторы [17, 18] пришли к следующим выводам:

- введение АШ в СОТС способствует стабилизации процесса резания и снижает на 20—30 % момент резания;
- разработанные СОТС наиболее эффективны для резбонарезания и сверления отверстий в труднообрабатываемых материалах;
- малые размеры частиц АШ позволяют использовать разработанные композиции в автоматизированных системах подачи СОТС.

Разработана СОТС для механической обработки металлов, содержащая минеральное масло, при этом она дополнительно содержит следующие компоненты, %:

- осерненный полиизобутилен — 5—15;
- хлорсульфированный жир — 2—5;
- АШ — 1—5;
- минеральное масло — остальное.

По мнению авторов, разработанные СОТС обеспечат замену сульфозрезола, олеиновой кислоты, жидкостей группы “В”. При этом наибольшая эффективность достигается на операциях ручного и машинного резбонарезания труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Применение разработанных СОТС позволяет:

- стабилизировать процесс резания;
- повысить качество обрабатываемой поверхности;
- увеличить срок службы инструмента в 1,5—4,0 раза по сравнению с лучшими российскими СОТС;
- улучшить условия труда за счет отсутствия в составах разработанных СОТС компонентов опасных для здоровья.

В [20] отмечено, что введение в смазку, используемую для процессов обработки металлов давлением, 1—5 % АШ позволяет существенно снизить коэффициент трения и повысить качество поверхности получаемых изделий.

Граничный слой в присутствии АШ в условиях высоких удельных нагрузок, превышающих во многих случаях предел текучести обрабатываемого металла, способен приобретать строение и упругость формы подобно твердому веществу. В этих условиях адсорбционному воздействию подвергаются ультрамикроскопические дефекты поверхности обрабатываемого материала. Это обеспечивает эффект облегчения деформации. При дальнейшем возрастании плотности контакта возможно шаржирование алмазными частицами рабочих поверхностей трибоконтакта. Очевидно, что заметный эффект может

быть получен при операциях прессования, волочения, калибровки, глубокой вытяжки.

АШ, по сравнению с обычным графитом, применяемым в настоящее время (размер частиц — 1—5 мкм) [21], обладает рядом преимуществ:

— вследствие высокой удельной поверхностной энергии наночастиц АШ обладает лучшей адгезией к металлическим поверхностям и способностью адсорбировать инородные молекулы;

— частицы АШ легко проникают в очаг деформации, задерживаясь в микронеровностях поверхностей заготовки и инструмента;

— АШ вследствие высокой удельной поверхности образует сплошной смазывающий слой между трущимися поверхностями, исключая их непосредственный контакт.

Важной особенностью АШ является то, что кроме частиц графита, обеспечивающих смазывающие свойства, в композиции содержатся частицы алмаза. Последние при трении внедряются (шаржируются) в металлическую поверхность. Взаимодействуя таким образом с поверхностью деформирующего инструмента, АШ может способствовать повышению его износостойкости.

В [22] исследовали условия модифицирования очищенных ДНА комплексными сульфонатами лантаноидов для получения устойчивых дисперсий в маслах, а также оценили возможности применения модифицированных ДНА в качестве экологически безопасных ингибиторов коррозии и модификаторов трения.

Автором [22] разработан метод синтеза комбинированных сульфонатов редкоземельных элементов для олеофильного модифицирования ДНА с получением устойчивых суспензий ДНА в маслах. Было установлено, что модифицированные ДНА являются эффективными модификаторами трения. Композиции, включающие системы La—Mg с ДНА и ультрадисперсным политетрафторэтиленом (УПТФЭ) предложены в качестве присадок к маслам и для обработки цилиндро-поршневой группы двухтактных моторов.

Поскольку высокая поверхностная активность ДНА приводит к их агрегированию даже в жидких полярных средах, то стабилизация степени дисперсности и структуры суспензий ДНА в неполярных средах возможна за счет модифицирования их поверхности. Предположено участие функциональных групп на поверхности ДНА в координации с ионами металлов, участвующих в синтезе сульфонатов (Ln, Mg, Zn).

В качестве исходных реагентов были выбраны водные суспензии ДНА или АШ. Водную суспензию ДНА (АШ) смешивали с алканаминами (диэтаноламином или триэтаноламином), диспергировали на гомогенизаторе при 8000 об/мин и упаривали для удаления воды, пока температура смеси не поднималась до 100—115 °С.

Было установлено, что ДНА, модифицированные на стадии синтеза комплексов редкоземельных элементов, образуют в промышленном масле устойчивые до года суспензии. При тех же условиях комплексы с АШ выпадают в осадок в течение месяца (следует отметить, что состав АШ автором [22] определен не был).

Трибологические испытания синтезированных композиций проводили в промышленных маслах И-12А или И-20А по ГОСТ 20779—75. Содержание присадок в масле во всех случаях составляло 2 %.

Наибольшая (5,0 кН) нагрузка задира зарегистрирована при добавке в масло комплекса маслорастворимых сульфонатов на основе лантана—маг-

ния. Дополнительное введение в систему ДНА (0,026—0,1 %) приводило к снижению противозадирных свойств композиции на 30 % (3,5 кН).

Модифицирование наноалмазами смазочной композиции, содержащей УПТФЭ, существенно изменяло характер фрикционного взаимодействия трущейся пары. Так, для композиции И-12А + 0,33 % УПТФЭ + 0,026 % ДНА значение коэффициента трения (0,011) после выхода на стационарный режим на протяжении практически всего времени испытаний не менялось, в отличие от величины коэффициента трения (0,042) композиции И-12А + УПТФЭ. При этом температура в зоне трения после прохождения минимума коэффициента трения для композиции И-12А + УПТФЭ увеличивалась скачкообразно и была в конце испытаний в 2 раза выше, чем для композиции И-12А + УПТФЭ + 0,026 % ДНА.

Имеющее место снижение коэффициента трения у композиции УПТФЭ—ДНА по сравнению с УПТФЭ, по мнению автора [22], может быть связано с изменением схемы напряженно-деформированного состояния в контакте металл—полимер. Внедрение ДНА в матрицу УПТФЭ, вероятно, снижает сопротивление сдвига между слоями матрицы в направлении нормали относительной скорости перемещения и приводит к уменьшению деформационной составляющей силы трения. Кроме того, в присутствии ДНА улучшается отвод тепла из трибозоны.

При проведении натуральных испытаний было показано, что применение смазок, содержащих наноалмазы совместно с УПТФЭ, приводит к снижению температуры двигателя и увеличению максимальных оборотов двигателя.

Таким образом, было установлено, что, в отличие от АШ, ДНА образуют устойчивые до года суспензии. Необходимым условием является использование в качестве исходных продуктов водных суспензий ДНА (но не высушенных порошков). По нагрузке задира лучшими являются системы La—Mg, а по коэффициенту трения — композиции, включающие системы La—Mg с ДНА и УПТФЭ.

В [23] показано, что применение АШ в пластичных смазках, по сравнению с базовыми смазками, такими как солидол, циатим, литол и другие, приводит к повышению износостойкости узлов трения в 1,2—3,0 раза, антифрикционности — на 6—20 %, а также снижению глубины повреждений в 1,2—3,0 раза и температуры в зоне контакта — на 16—19 %.

Значительный эффект достигается при использовании ДНА и АШ в составе твердой, на основе углеводов, смазки, наносимой на абразивные круги при сухой шлифовке. Разработанный состав, по сравнению с базовым, позволяет на 20—50 % поднять прижоговую стойкость и уменьшить на 1—2 класса шероховатость обрабатываемой поверхности.

Кроме того, промышленные испытания показали, что производительность шлифовальных операций повышается на 20—30 %, снижается “засаливание” поверхности абразива, уменьшается температура шлифовальных зерен и поверхности обрабатываемой детали.

Свойства и составы многих масляных композиций подробно описаны в [19, 24].

На основе ДНА предложен антифрикционный материал с интерметаллидами меди, цинка, олова [25] и графитов [26].

## ВЫВОДЫ

Детонационные наноалмазы и алмазосодержащая шихта являются эффективными модификаторами трения в масляных композициях и совместимы с минеральными, синтетическими и растительными маслами.

Добавки АШ или ДНА позволяют достичь следующих эффектов:

- уменьшают граничное трение и износ;
- на поверхностях трения образуют защитный слой из наноалмазов, препятствующий адгезионному схватыванию и образованию задиров;
- снижают коэффициент трения на 20—30 %;
- повышают ресурс инструментов в 1,5—4,0 раза, а износ пары трения уменьшают в 1,3—3,0 раза;
- обеспечивают рост предельных нагрузок на пару трения в 4 раза.

Оптимальное количество АШ в маслах составляет 0,05—0,50 % в зависимости от условий эксплуатации алмазо-масляной композиции.

Модифицирование ДНА сульфонатами лантаноидов приводит к получению устойчивых до одного года суспензий в масле и минимальному (0,011) коэффициенту трения при их использовании.

*Викладено основні результати дослідження можливості використання детонаційних алмазів і їх алмазовмісної шихти (напівпродукт синтезу алмазів) в якості високоєфективних і противозносних домішок в мастильні композиції. Показано ефективність застосування продуктів: ресурс інструментів і деталей збільшується у 1,5—4,0 рази і зростання граничних навантажень на пару тертя — в 4 рази.*

**Ключові слова:** детонаційні наноалмази, алмазовмісна шихта, антифрикційні та противозносні домішки, мастильні композиції.

*The paper presents the main findings of the investigation into the potential of using detonation nanodiamonds and diamond-containing soot (an intermediate product of the nanodiamond synthesis) as high-performance antifriction and wear-preventive additives to oil-based compounds. The application of these products is demonstrated to offer great benefits: the lifetime of tools and parts is extended 1.5—4.0 times and the ultimate load values for a friction pair are raised 4-fold.*

**Key words:** detonation nanodiamonds, diamond-containing soot, antifriction and wear-preventive additives, oil-based compounds.

1. Тартаковский И. Б. К расчету деталей машин на износ. Износ и антифрикционные свойства материалов. — М.: Наука, 1968. — 68 с.
2. Гархунов Д. Н. Избирательный перенос в узлах трения. — М.: Транспорт, 1969. — 104 с.
3. Грибайло А. П., Епифанов А. С. Повышение износостойкости пары винт—гайка металлообрабатывающих станков методом избирательного переноса // Науч.-техн. семинар “Применение избирательного переноса в узлах трения машин”, Москва, 4—6 марта 1976 г.: Сб. тез. — М.: Госстандарт СССР, 1976. — В 2 ч. Ч. 1. — С. 59.
4. Горюнов В. М. Металлоплакирующая смазка в тяжело нагруженных шарнирах. Тепловая динамика и моделирование внешнего трения. — М.: Наука, 1975. — С. 102—105.
5. Колесниченко Л. Ф. Влияние халькогенидов молибдена на триботехнические свойства смазочных материалов // Порошк. металлургия. — 1987. — № 11. — С. 67—71.
6. Matsuo K., Maede U., Kurabashi M., Miuva M. Additive Schmierst und Arbeitssigkeit // 5th Int. Kollog., Esslingen, Germany, 14—16 jan., 1986. — Esslingen, 1986. — Bd. 2. — P. 5.417—5.418.
7. Yamada K., Sawaoka A. B. Very small spherical crystals of distorted diamond found in a detonation product of explosive graphite mixtures and their formation mechanism // Carbon. — 1994. — 32, N 4. — P. 665.
8. Ouyang Q., Okada K. Nano-ball bearing effect of ultra-fine particles of cluster diamond // Appl. Surf. Sci. — 1994. — 78, N 3. — P. 309—313.

9. Сакович Г. В., Брыляков П. М., Верещагин А. Л. и др. Получение алмазных кластеров взрывом и их практическое применение // Журн. Всесоюз. хим. об-ва. — 1990. — 35, № 5. — С. 600—602.
10. Xu T., Zhao J, Xue Q. Study on the tribological properties of ultradispersed diamond containing soot as an oil additive // Tribology transactions. — 1997. — 40, N 1. — P. 178.
11. Лямкин А. И., Редькин В. Е. Ультрадисперсные алмазографитовые и алмазные порошки, получаемые из взрывчатых веществ // Наука — производству. — 2000. — № 3(28). — С. 59—64.
12. Пат. 87/00249 PCT/SU, МКП<sup>5</sup> С 10 М 125/02. Смазочная композиция с твердым модификатором трения / Г. В. Сакович, П. М. Брыляков, Т. М. Губаревич и др. — Оpubл. 04.04.91.
13. Щелканов С. И., Кан С. В., Редькин В. Е. Влияние присадок на антифрикционные свойства моторных и трансмиссионных масел // Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства: Межвуз. сб. / Под ред. А. М. Ставера. — Красноярск: КрПИ, 1990. — С. 173—180.
14. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойств и применение // Успехи химии. — 2001. — 70, № 7. — С. 687—708.
15. Пат 93/01261 PCT WO, МКП<sup>5</sup> С 10 М 125/02. Смазочная композиция / А. А. Захаров, В. Е. Редькин, А. М. Ставер и др. — Оpubл. 21.01.1993.
16. Санников В. М., Корейбо Ю. М. О приработочной способности ультрадисперсного алмазо-графитного порошка // Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства: Межвуз. сб. / Под ред. А. М. Ставера. — Красноярск: КрПИ, 1990. — С. 155—161.
17. Шангин А. П., Редькин В. Е., Ракишин Э. Д., Селигеев С. В. Использование УДП-АГ в смазочно-охлаждающих композициях для обработки металлов резанием // Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства: Межвуз. сб. / Под ред. А. М. Ставера. — Красноярск: КрПИ, 1990. — С. 165—170.
18. Пат. 2009186 Россия. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки металлов / В. Е. Редькин, А. М. Ставер, А. П. Шангин. — Оpubл. 15.05.92, Бюл. № 5.
19. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. — Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 344 с.
20. Истомин В. Н., Ракишин Э. Д., Акимов Ю. Д. Применение ультрадисперсного порошка алмазографита в технологических смазках для обработки металлов давлением // Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства: Межвуз. сб. / Под ред. А. М. Ставера. — Красноярск: КрПИ, 1990. — С. 161—163.
21. Бондаренко М. В. Графито-коллоидные смазки для обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. — 1964. — № 10. — С. 13—14.
22. Иванов Д. М. Технология маслорастворимых комплексов сульфонатов лантаноидов и Mg как ингибиторов коррозии и модификации трения // Авторефер. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург: ГОУ ВПО “Уральский гос. техн. ун-т - УПИ”. — 2006. — 26 с.
23. Сакович Г. В., Комаров В. Ф., Петров Е. А. и др. Ультрадисперсные алмазы и их практическое использование // 5-е Всесоюзное совещание по детонации: Сб. докл. — Красноярск, 1991. — Т. 2. — С. 272—278.
24. *Ultrananocrystalline diamond, synthesis, properties, and applications* / Ed. O. A. Shenderova, D. M. Gruen. — New York, USA: William Andrew Publishing, Norwich, 2006. — 600 p.
25. Pat. 5158695 US. Diamond-based antifriction material / N. K. Yashchenki, V. V. Ogorodnik. — Publ. 27.10.92
26. Pat. 5614477 US. Antifriction additive and method for using same / V. Kompan, V. Slobodsky. — Publ. 25.03.98.

ФГУП Специальное конструкторско-технологическое бюро “Технолог”

Поступила 16.10.09