

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТОРНОГО МАСЛА,  
МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ****Толочко Н.К.**, д. ф.-м. н., профессор*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь***Крауклис А.В.**, к. ф.-м. н., **Становой П.Г***Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь***Шиенок Ю.А.***Витебский государственный университет им. П.М. Машерова,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Износ деталей в узлах трения скольжения является одной из наиболее распространенных причин нарушения режима нормального функционирования и, в конечном итоге, выхода из строя машин. Для снижения износа используются различные виды смазочных масел, которые обеспечивают эффект жидкостного трения, заключающийся в образовании жидкой прослойки между трущимися поверхностями, препятствующей их непосредственному соприкосновению. При жидкостном трении работа на преодоление сил трения в основном направлена на преодоление сил молекулярного притяжения жидкой смазки.

Жидкостное трение зависит от различных факторов, к числу которых относятся смазывающая способность масла, в значительной мере определяемая его вязкостью, а также скорость относительного движения трущихся деталей, нагрузка на них и величина зазора между ними. При чрезмерно высокой вязкости масла возрастает работа на преодоление сил трения и, кроме того, затрудняется подача масла в зазор. Чем больше зазор, т.е. чем толще слой смазки, тем надежнее жидкостное трение. Однако при чрезмерно большом зазоре становится все более возможным выдавливание масла. Вероятность выдавливания масла возрастает с понижением его вязкости, а также с повышением нагрузки на детали. По мере вытекания масла из зазора жидкостное трение сменяется на менее благоприятное граничное трение, при котором поверхности разделяются только лишь адсорбированными молекулярными масляными пленками. Если прочность сцепления таких пленок с поверхностью невелика, то они разрушаются, что приводит к полусухому или даже сухому трению, при котором резко возрастает износ трущихся поверхностей, на них появляются задиры и происходит сваривание деталей.

Традиционный путь улучшения свойств смазочных масел – добавление к ним противоизносных присадок. Эти присадки состоят из поверхностноактивных веществ, образующих на поверхности деталей прочные адсорбированные масляные пленки, благодаря чему повышается сопротивление масел выдавливанию. Кроме того, такие пленки способны оказывать полирующее воздействие на поверхности. В качестве присадок используются различные продукты на основе высокомолекулярных жирных кислот, а также синтетические соединения, содержащие серу, хлор, фосфор.

В последние годы, в связи с развитием нанотехнологий, ведется разработка смазочных масел, модифицированных наночастицами различного состава (металлов, оксидов, полимеров, углерода) [1]. В частности, значительное внимание уделяется созданию смазок с добавками углеродных наночастиц, обеспечивающих заметное снижение износа поверхностей трения [2-4]. Однако особенности модифицирующего воздействия наночастиц на свойства смазочных масел изучены недостаточно. До сих пор нет ясного и полного понимания причин влияния наномодификаторов на механизм трения. Предполагается, в част-

ности, что благодаря наличию в смазочной жидкости наночастиц в зоне контакта деталей узла трения обеспечивается создание эффективного разделительного слоя вследствие адсорбционного взаимодействия углеродных наночастиц и молекул смазки с образованием ионных кластеров, препятствующего взаимодействию деталей. Образующие этот слой наночастицы, деформируясь под действием контактных давлений и сдвиговых напряжений, становятся способными изменять микрорельеф контактной зоны, заполняя микронеровности поверхностей трения и, тем самым, уменьшая величину контактного давления. Противозносные разделительные слои, формируемые наночастицами, обладают довольно высокой стойкостью к разрушению под действием контактных давлений и температур [1]. Поэтому смазочные жидкости, модифицированные наночастицами, перспективно использовать в тяжело нагруженных узлах трения.

С практической точки зрения важно создавать наномодифицированные смазочные материалы с заданными свойствами, для чего необходимо более детальное изучение зависимости их свойств от условий получения.

Важнейшими частями транспортных, а также самоходных технологических машин являются двигатели внутреннего сгорания, в состав которых входит ряд узлов трения скольжения (системы поршень – цилиндр, коленчатый вал – подшипники и др.). Для снижения износа трущихся деталей двигателей применяется моторное масло. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования триботехнических характеристик моторного масла, модифицированного углеродными наночастицами.

Для приготовления масляных наносuspензий в качестве дисперсионной среды использовали масло моторное универсальное М-8В (ГОСТ 10541-78, производство ОАО «Нафтан», г. Новополоцк), а в качестве дисперсной фазы – порошкообразный углеродный наноматериал, который был синтезирован путем обработки метано-воздушной смеси плазмой высоковольтного разряда атмосферного давления в ИТМО НАН Беларуси [5]. Углеродный наноматериал по отношению к выбранному маслу являлся олеофильным и обладал хорошей смачиваемостью (краевой угол смачивания углеродной подложки  $\theta = 11^\circ$ ).

В экспериментах применяли нанопорошки двух типов: порошок типа Н – преимущественно состоял из углеродных нанотрубок и нановолокон со средним диаметром 50 нм (более 80 % масс.); порошок типа М – в основном представлял собой аморфный углерод (сажу).

Исходный углеродный наноматериал предварительно подвергался ультразвуковому (УЗ) диспергированию, которое проводилось в 10%-ной (по массе) суспензии углеродного материала в техническом этиловом спирте с использованием УЗ диспергатора погружного типа. Параметры УЗ колебаний: частота 22 кГц, амплитуда 20 мкм. Длительность УЗ обработки  $t$  в разных экспериментах варьировалась и составляла 20, 40 и 60 мин. Обработка велась в условиях термостатирования (температура суспензии во время обработки составляла 40-60°C).

Эффективность УЗ диспергирования оценивалась путем дисперсионного анализа. Кроме того, о степени диспергирования можно было судить по наблюдаемым с помощью электронного микроскопа особенностям разрушения частиц, т.е. особенностям их геометрических и структурных характеристик, которые они приобретали после УЗ обработки (рисунок 1).

Для углеродных материалов обоих типов установлен нелинейный характер зависимости измельчения размеров частиц от длительности УЗ обработки  $t$ : сначала с увеличением  $t$  наблюдается заметное измельчение частиц, которое становится наиболее значительным при  $t=40$  мин, при дальнейшем увеличении  $t$  происходит агломерация ранее образовавшихся фрагментов частиц.

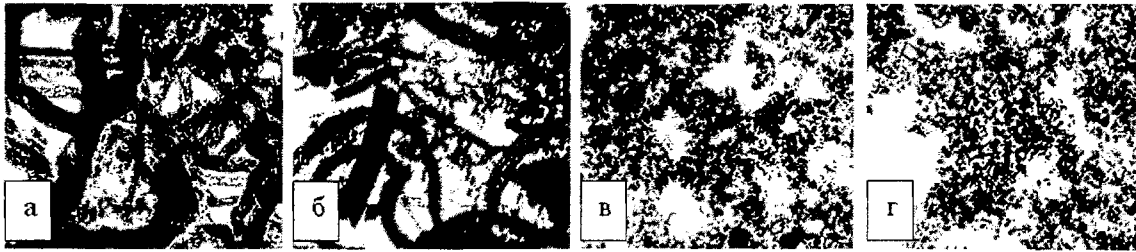


Рисунок 1 – Типичный вид углеродного нанопорошка до (а, в) и после (б, г) УЗ обработки в спирте (а, б – порошок Н-типа; в, г – порошок М-типа)

После окончания УЗ диспергирования спирт испарялся, а полученный сухой порошок, состоящий из слабосвязанных агрегатов размером не более 0,5 мкм – слипшихся в комки фрагментов измельченных наночастиц, использовался для получения масляных наносuspensions путем введения порошка в масло с последующей кратковременной (в течение 5 мин) УЗ обработкой. Концентрация углеродного наноматериала  $C$  в масляных наносuspensions составляла 0,1% масс.

Наносuspensions сразу же после приготовления (во избежание возможного оседания наночастиц) подвергались триботехническим испытаниям на четырехшариковой испытательной машине по стандартной методике. Смазывающая способность масла оценивалась по диаметру пятна износа стальных шариков  $D_{и}$ . В ходе испытаний установлен нелинейный характер зависимости показателя износа  $D_{и}$  от длительности УЗ обработки  $t$ , соответствующий рассмотренному выше нелинейному характеру аналогичной зависимости измельчения размеров частиц (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость показателя износа  $D_{и}$  от длительности УЗ обработки  $t$

Тип порошка	$t$ , мин	$D_{и}$ , мм	Уменьшение износа по сравнению с чистым маслом, %
Без порошка (чистое масло)	-	0,55	-
Тип Н	0	0,44	20,00
	20	0,41	25,46
	40	0,39	29,09
	60	0,40	27,27
Тип М	0	0,41	25,45
	20	0,37	32,73
	40	0,35	36,36
	60	0,37	32,73

Сначала с увеличением  $t$  наблюдалось заметное уменьшение износа, которое становилось наиболее значительным при  $t = 40$  мин, а затем было менее заметным при дальнейшем увеличении  $t$ . Противозносные свойства наносuspensions на основе нанопорошка М-типа были лучше, чем порошка Н-типа: максимальное уменьшение износа по сравнению с чистым маслом в первом случае составляло приблизительно 36,4%, во втором – 29,1%.

С учетом полученных результатов для наносuspensions на основе нанопорошка М-типа была исследована зависимость показателя износа  $D_{и}$  от концентрации углеродного наноматериала  $C$  в наносuspensions в процессе диспергирования. Как оказалось, эта зависимость также имеет нелинейный характер (таблица 2): наибольшее уменьшение износа по сравнению с чистым маслом (приблизительно 36,4%) наблюдается при  $C = 0,1\%$  масс.

Таблица 2 – Зависимость показателя износа  $D_{и}$  от концентрации углеродного наноматериала  $C$  в наносuspензии в процессе УЗ обработки (для нанопорошка М-типа)

$C$ , % масс.	$D_{и}$ , мм	Уменьшение износа по сравнению с чистым маслом, %
0	0,55	-
0,05	0,52	5,45
0,1	0,35	36,36
0,25	0,42	23,64
0,5	0,46	16,36
1	0,47	14,55

На завершающей стадии экспериментов были исследованы противоизносные свойства наносuspензий, полученных с использованием следующих возможных методов диспергирования углеродного наноматериала:

- прямое УЗ диспергирование в масле ( $t = 40$  мин,  $C = 0,1\%$  масс.);
- двухстадийное УЗ диспергирование: в спирте ( $t = 40$  мин,  $C = 1\%$  масс.) и в масле ( $t = 5$  мин,  $C = 0,1\%$  масс.);
- двухстадийное УЗ /механическое диспергирование: УЗ диспергирование в спирте ( $t = 40$  мин,  $C = 1\%$  масс.) и перемешивание высокоскоростной (3000 об/мин) наклонно-лопастной мешалкой ( $t = 5$  мин,  $C = 0,1\%$  масс.).

На рисунке 2 показаны пятна износа неподвижных нижних шаров, а в таблице 3 представлены показателя износа  $D_{и}$  для разных методов наномодифицирования.

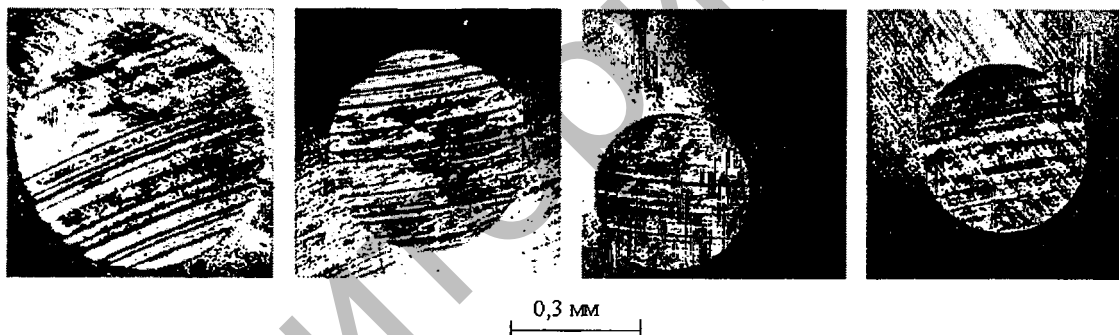


Рисунок 2 – Пятна износа при различных методах наномодифицирования (для нанопорошка М-типа)

Таблица 3 – Зависимость показателя износа  $D_{и}$  от метода наномодифицирования (для нанопорошка М-типа)

Метод наномодифицирования	$D_{и}$ , мм	Уменьшение износа по сравнению с чистым маслом, %
Без модифицирования (чистое масло)	0,55	-
Прямое УЗ диспергирование	0,45	18,18
Двухстадийное УЗ диспергирование	0,35	36,36
Двухстадийное УЗ / механическое диспергирование	0,38	30,91

Наибольший эффект наномодифицирования обеспечивает двухстадийное УЗ диспергирование. Аналогичный (немного меньший) эффект наномодифицирования имеет место при двухстадийном УЗ / механическом диспергировании, которое целесообразно

применять в тех случаях, когда высокоэнергетическая ультразвуковая обработка, сопровождающаяся интенсивной кавитацией, может оказывать деструктивное воздействие на смазочные материалы, в частности, имеющие сложную высокомолекулярную структуру.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что применение моторного масла, модифицированного углеродными наночастицами, может приводить к существенному снижению износа трущихся деталей – на 30% и более (при определенных условиях приготовления масляных наносuspensions). Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии получения наномодифицированного моторного масла с улучшенными триботехническими характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Струк В.А., Кравченко В.И. Нанокomпозиционные полимерные материалы и технологии. В кн.: Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко, Ф.И. Пантелеенко, А.Р. Рогачев и др. М.: Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004. – 519 с.
2. Люты М. и др. Триботехнические характеристики смазочных материалов, модифицированных нанодисперсными наполнителями // Наноструктурные материалы – 2002: Беларусь – Россия. Тезисы докл. 2-го научно-техн. сем., 24-25 окт. 2002. М.: ИМЕТ РАН, 2002. – С. 44.
3. Струк В.А. и др. Механизм изнашивания композиционных материалов с нанодисперсными наполнителями // Там же. – С. 45.
4. Жорник В.И., Ивахник А.В. Влияние наноразмерных углеродных добавок на структуру пластичных смазок и износостойкость поверхностей трения // В кн.: Углеродные наноструктуры. Сб. научных трудов. Мн.: ИТМО, 2006. – С. 81-87.
5. Жданок С.А., Буюков И.Ф., Чернухо А.П., Крауклис А.В. и др. Синтез углеродных нанотрубок в неравновесных условиях. // В кн.: Фуллерены и фуллереноподобные структуры. Сб. науч. тр. Минск: ИТМО, 2005. – С.32-40.

#### Аннотация

##### **Триботехнические характеристики моторного масла, модифицированного углеродными наночастицами**

Проведенные эксперименты показывают, что применение моторного масла, модифицированного углеродными наночастицами, может приводить к существенному снижению износа трущихся деталей – на 30% и более (при определенных условиях приготовления масляных наносuspensions). Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии получения наномодифицированного моторного масла с улучшенными триботехническими характеристиками.

#### Abstract

##### **Tribotechnical characteristics of engine oil modified by carbon nanoparticles**

The results of experiments on engine oil fabrication and tribotechnical characteristics investigation are presented. It is shown that application of modified oil results in significant reducing the wear of friction unit components.