

Влияние наноалмазов кавитационного синтеза на трибологические свойства смазывающе-охлаждающей жидкости на водомасляной основе

Фоминов Евгений Валерьевич*^{1,3}, кандидат технических наук, доцент
Ковтун Максим Витальевич^{2,4}, руководитель научно-технического центра
Курлович Сергей Анатольевич^{2,5}, директор
Гладких Дмитрий Игоревич^{1,6}, аспирант
Лавренова Татьяна Владимировна^{1,7}, старший преподаватель

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону (Россия)

²ТПК «СИНТЕЗ», Ростов-на-Дону (Россия)

*E-mail: fominoff83@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1489-8333>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3606-6311>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-256X>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-7730>

Поступила в редакцию 20.02.2025

Пересмотрена 08.04.2025

Принята к публикации 06.05.2025

Аннотация: Статья посвящена изучению влияния наноразмерных алмазов, полученных методом кавитационного синтеза, на трибологические характеристики коммерческой смазывающе-охлаждающей жидкости на водомасляной основе. Исследование направлено на оценку перспектив применения наноалмазов данного типа в качестве антифрикционной и противоизносной присадки. Трибологические испытания проводились по схеме трения «индентор по диску» при постоянной нагрузке и скорости скольжения. В качестве материалов пары трения использованы быстрорежущая сталь P18 для индентора и сталь 30ХГСА для вращающегося контртела (диска). Исследования проведены для базового смазочного материала и двух вариантов модификаций его состава коллоидной дисперсией (дистиллированная вода с диспергированными наноалмазами) с окончательной концентрацией присадки 0,5 и 2,5 %. Экспериментально установлено, что оба варианта модификации базовой водомасляной эмульсии привели к увеличению несущей способности смазочных слоев, снизив суммарный линейный износ элементов пары трения в 1,8–2,4 раза. Присутствие наноалмазов в составе также усилило экранирующий эффект смазочно-охлаждающей жидкости. Средством оптической микроскопии было зафиксировано снижение видимых повреждений поверхностей трения. Анализ профилограмм изношенных участков в поперечном направлении показал уменьшение размеров борозды на контртеле на фоне снижения шероховатости с $Ra=0,49$ мкм в базовом варианте до $Ra=0,29–0,34$ мкм. Оценка потери массы контртел для концентраций наноалмазов 0,5 и 2,5 % показала снижение их величины в 1,3 и 1,9 раза соответственно, для индентора уменьшение этого параметра составило 1,2 и 1,5 раза. Таким образом, использование наноалмазов кавитационного синтеза в качестве присадки может стать перспективным направлением повышения противоизносных свойств смазывающе-охлаждающих жидкостей на водомасляной основе.

Ключевые слова: наноалмазы кавитационного синтеза; водомасляная эмульсия; смазывающе-охлаждающая жидкость; граничное трение; износостойкость; коэффициент трения.

Для цитирования: Фоминов Е.В., Ковтун М.В., Курлович С.А., Гладких Д.И., Лавренова Т.В. Влияние наноалмазов кавитационного синтеза на трибологические свойства смазывающе-охлаждающей жидкости на водомасляной основе // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 2. С. 87–94. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-7.

ВВЕДЕНИЕ

Использование различного рода присадок является эффективным способом управления трибологическими свойствами жидких смазочных материалов. В последнее десятилетие для этих целей широко используются наночастицы различных металлов, оксидов металлов и неметаллов, сульфиды и карбонаты [1; 2]. Модификация базового смазочного материала путем внедрения таких добавок, как правило, приводит к существенному улучшению его антифрикционных и/или противоизносных свойств [3; 4]. Высокой востребованностью среди наноразмерных присадок пользуются полностью углеродные

частицы (графены, фуллерены, углеродные нанотрубки), позволяющие значительно улучшить трибологические свойства базовых смазочных материалов [5–7].

Среди углеродных наноприсадок особенно перспективным является применение наноалмазов (НА), что обусловлено их высокой твердостью, теплопроводностью, химической стабильностью и совместимостью с другими присадками [8]. На данный момент проведено большое количество подробных исследований трибологических характеристик различных видов смазочных материалов, содержащих НА. Так, авторы работы [9] отмечают значительное улучшение трибологических характеристик моторных масел, содержащих частицы НА,

© Фоминов Е.В., Ковтун М.В., Курлович С.А.,
Гладких Д.И., Лавренова Т.В., 2025

и качества поверхностей трения. При исследовании процесса трения в среде полиальфаолефинового масла с добавлением НА также было обнаружено снижение коэффициентов трения и повышение противоизносного действия смазочной пленки для состава с присадкой [10]. В [11] было зафиксировано уменьшение силы трения в 3 раза и повышение в 2 раза износостойкости титановых эндопротезов тазобедренного сустава при добавлении менее 0,2 % НА в концентрации по массе в имитацию физиологической жидкости организма.

Важным преимуществом НА является растворимость в воде, что открывает возможности для модификации ими как чистой воды, так и смазочных материалов на водной основе. В связи с этим изучение трибологических свойств водных суспензий с НА является актуальным направлением научных исследований. Например, исследование [12] показало, что введение НА значительно улучшило плохие смазывающие свойства воды, снизив силы трения и износ на 70 и 88 % соответственно. Аналогичный антифрикционный эффект и противоизносное действие модифицированной НА воды также отмечены в работах [13; 14].

Широко распространенной категорией смазочных материалов являются водомасляные эмульсионные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), применяемые при резании металлов и их обработке методами пластического деформирования. Одним из направлений улучшения эксплуатационных характеристик СОЖ является внедрение в состав различных наноразмерных присадок, усиливающих их противозадирное действие, улучшающих антифрикционные и теплофизические свойства [15–16].

В настоящее время существует множество различных способов получения НА. Примерами наиболее привлекательных из них с точки зрения промышленного воспроизведения являются: метод импульсной лазерной абляции специально приготовленной углеродной мишени [18]; метод детонации взрывчатых веществ в закрытых камерах [19] и некоторые другие. Перспективным и востребованным для промышленного применения является также метод гидродинамической кавитации, заключающийся в пропускании воды с диспергированным в ней графитовым порошком особой чистоты через микрофлюидные каналы особой геометрии с подачей в зону, где в результате коллапса/схлопывания кавитационных каверн происходит образование разрушающих кумулятивных струй, буферного слоя с последующим дополнительным воздействием на коллапсирующие каверны полей со сверхкритическими параметрами.

Данный метод представляет наибольший интерес с точки зрения применимости НА, полученных с его использованием, в качестве модифицирующей добавки в водных системах, таких как гипс, смазочно-охлаждающие жидкости, гальваника, бетон. Преимущества метода заключаются в получении НА, обладающих высокой однородностью основных характеристических показателей: размерности, формы, зарядности, функционального покрова. Полученные данным методом наноалмазы кавитационного синтеза (КНА-НС) не требуют дополнительной химической очистки, центрифугирования и прочих подготовительных операций. Сразу же после синтеза водная дисперсия НА готова к промышленному применению, поскольку диспергированные в дистиллированной воде НА являются полностью гидратированными. На текущий

момент уже проведены исследования влияния КНА-НС на физико-механические свойства строительных бетонов, в результате которых зафиксировано значительное повышение прочности на сжатие и изгиб при добавлении частиц КНА-НС в базовую смесь [20].

Цель исследования – оценка влияния наноразмерных алмазов, полученных методом кавитационного синтеза, на трибологические свойства коммерческой смазывающе-охлаждающей жидкости на водомасляной основе.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительные трибологические испытания проводились по схеме трения «индентор по диску» при постоянной скорости скольжения $V=0,4$ м/с и нагрузке $P=20$ Н на трибометре Т-11 (Польша). Материалом цилиндрического индентора диаметром 4 мм и длиной 10 мм являлась быстрорежущая сталь Р18 (HRC 65). Вращающееся контртело (диск) диаметром 25,4 мм и толщиной 6 мм было изготовлено из стали 30ХГСА (HRC 35), начальная шероховатость поверхностей трения составляла $Ra=0,16$ мкм. Данная пара трения имитирует фрикционное взаимодействие в ходе резания (выглаживания) труднообрабатываемого конструкционного материала. При этом процесс трения без смазки данных материалов, по предыдущему экспериментальному опыту авторов, характеризуется сильным адгезионным схватыванием. В ходе испытаний в режиме реального времени фиксировались сила трения $F(H)$ и перемещение индентора относительно контртела Δ (мкм). Длина пути трения составляла $L=400$ м. Для оценки рельефа дорожек трения и измерения шероховатости применялся профилограф-профилометр Mitutoyo SurfTest SJ-210 (Япония). Изношенные поверхности образцов исследовались на металлографическом инвертированном микроскопе ЛабМет-И4 (Россия). Оценка экранирующего эффекта смазочной жидкости производилась на основании сравнения износа более мягкого материала контртела. Для измерения потери массы образцов Δm применялись аналитические весы модели ЛВ 210-А (Россия).

Процесс трения осуществлялся в трех вариантах смазочных сред. В первом базовом случае использована коммерческая СОЖ торговой марки Модус-М (ООО ТПК «СИНТЕЗ», г. Ростов-на-Дону, Россия). Данная полусинтетическая водосмешиваемая СОЖ в рабочем растворе представляет собой 5%-ю водомасляную эмульсию и содержит в своем составе наименьшее количество масла и прочих экологически опасных функциональных добавок. В двух последующих вариантах эмульсия была модифицирована коллоидной дисперсией, состоящей из диспергированных в дистиллированной воде НА. Для приготовления дисперсии использованы синтезируемые ООО НПК «Наносистемы» (г. Ростов-на-Дону, Россия) КНА-НС, представляющие собой нанокристаллы сферической формы с отрицательным дзета-потенциалом $\zeta=-44$ мВ. Их синтез осуществлялся методом гидродинамической кавитации из диспергированного в дистиллированной воде порошка графита особой чистоты с дополнительным воздействием на систему чередующихся полей со сверхкритическими параметрами. Методом динамического рассеяния света было установлено, что коллоидный раствор полученных наноалмазов имеет высокую моносферность с максимумом от 1 до 3 нм (рис. 1).

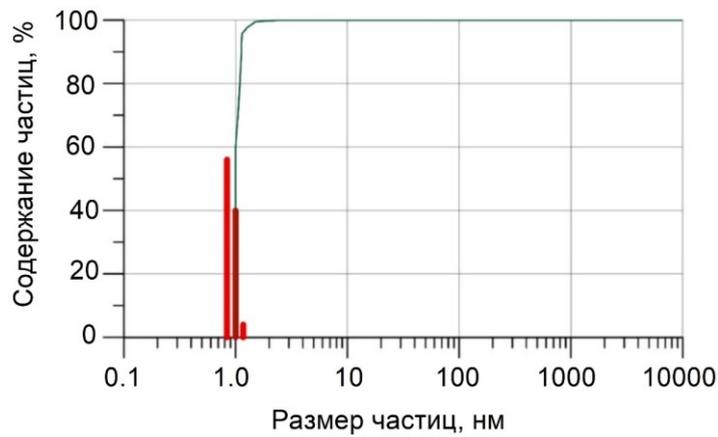


Рис. 1. Распределение размеров частиц наноалмазов [24]
 Fig. 1. Particle size distribution of nanodiamonds [24]

Для оценки влияния наноалмазов КНА-НС на трибологические характеристики коммерческой СОЖ в ее состав было добавлено 0,5 и 2,5 % коллоидной дисперсии КНА-НС. Контроль концентрации водной коллоидной дисперсии КНА-НС определялся фотометрически на фотометре Эксперт-003 с пропусканием через кварцевую кюветку с длиной оптического пути 1 мм и длиной волны просвечивающего лазера 375 нм. Оптическую плотность доводили путем разбавления концентрированной дисперсии КНА-НС-2772 дистиллированной водой.

Подача смазочных материалов осуществлялась непосредственно на дорожку трения капельным методом с расходом около 2 мл/мин. Количество реализаций опыта для каждого варианта смазки составляло 5 экспериментов, статистическая обработка результатов проводилась с применением методов теории надежности в программе MathCAD. Для расчета значений гра-

ниц доверительных интервалов для оцениваемых параметров применялся метод Стьюдента при заданном уровне надежности 95 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка трибологических свойств образцов смазочного материала показала, что оба варианта концентрации КНА-НС в базовой СОЖ приводят к увеличению средних значений сил трения. На рис. 2 представлены примеры эволюции коэффициентов трения f в процессе экспериментов.

По результатам статистической обработки среднее значение коэффициента трения для базового варианта смазки составило $f_{cp}=0,08$, при добавлении 0,5 и 2,5 % КНА-НС значение этого параметра повысилось до 0,11 и 0,13 соответственно (таблица 1).

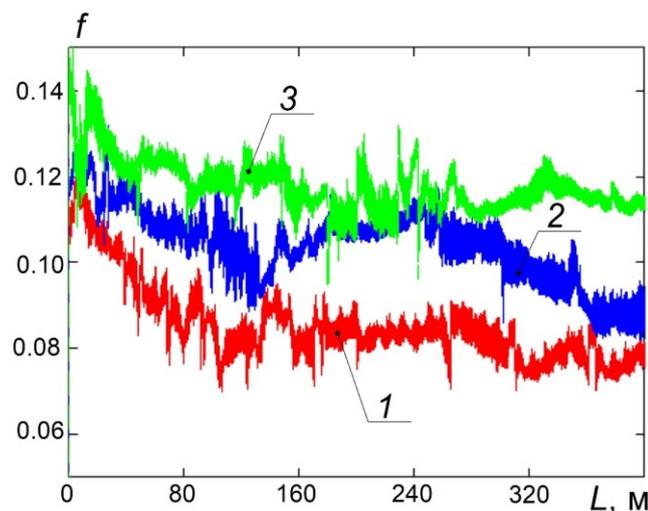


Рис. 2. Изменение коэффициентов трения $f(L)$ в различных средах:
 1 – базовая СОЖ; 2 – СОЖ + 0,5 % КНА-НС; 3 – СОЖ + 2,5 % КНА-НС
 Fig. 2. Change in friction ratios $f(L)$ in various environments:

1 – base cooling lubricant; 2 – cooling lubricant + 0.5 % of CND-NS; 3 – cooling lubricant + 2.5 % of CND-NS

Таблица 1. Трибологические характеристики процесса трения в различных смазочных средах
Table 1. Tribological characteristics of the friction process in various lubricating environments

Тип смазки	f_{cp}	Контртело				Индентор
		δ , мкм	h_{max} , мкм	$\Delta m_k \cdot 10^{-3}$, г	Ra, мкм	$\Delta m_n \cdot 10^{-4}$, г
Базовая СОЖ	0,08±0,02	7,88±0,99	7,49±1,67	3,21±0,64	0,49±0,16	9,2±0,75
СОЖ + 0,5 % НА	0,11±0,03	4,45±0,59	4,81±0,86	2,33±0,56	0,34±0,07	7,6±0,81
СОЖ + 2,5 % НА	0,13±0,02	3,41±0,46	3,22±0,73	1,67±0,40	0,29±0,05	5,8±0,98

Оценка изменения геометрии трибоконтакта относительно начального положения по кривым $\Delta(L)$ показала, что добавление присадок способствовало замедлению сближения элементов пары трения за счет процессов изнашивания (рис. 3).

Наименьший суммарный линейный износ элементов трибопары был зафиксирован при концентрации 2,5 % и составил в среднем $\delta_3 \approx 3,4$ мкм, тогда как для базовой СОЖ эта величина достигала $\delta_1 \approx 7,8$ мкм.

Наибольшие повреждения поверхности образцов получили при трении в немодифицированной СОЖ (рис. 4 а). Ширина дорожек трения в этом случае достигала 1000 мкм, глубина износа $h_{max} \approx 7,5$ мкм, а шероховатость дорожек трения в поперечном направлении $Ra=0,49$ мкм. Оценка массовых потерь образцов также показала наибольшие значения этих параметров при трении в базовой СОЖ (таблица 1).

В меньшей степени повреждены поверхности образцов при фрикционном взаимодействии в среде СОЖ + + 2,5 % КНА-НС. Ширина дорожки трения в этом варианте смазки не превышает 600 мкм, глубина изношенного участка составляет $h_{max} \approx 3,2$ мкм. Шероховатость дорожек трения для этой концентрации составила $Ra=0,29$ мкм. Высокий экранирующий эффект обнаруживается и при добавлении гораздо меньшего количества присадки – при

концентрации 0,5 % КНА-НС (рис. 4 б). В этом случае также наблюдается улучшение всех исследуемых трибопоказателей (таблица 1, рис. 4 с).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Введение нанокластеров КНА-НС в водомасляную эмульсию в различных концентрациях существенным образом снижает скорость изнашивания относительно базовой конфигурации трибосистемы, однако приводит к росту сил трения. При этом величины коэффициентов трения во всех случаях показывают, что в трибосистеме сохраняется граничный режим смазки.

Метод и режим получения НА, определяющие их форму, средний размер и прочие статистические показатели геометрических характеристик, в значительной степени влияют и на трибологическое поведение смазочного материала при введении в него этих частиц. Антифрикционный эффект от добавления НА по результатам современных исследований преимущественно связан с частичной заменой трения скольжения на трение качения за счет присутствия в зазоре достаточно крупных в сравнении с размерами поверхностных микронеровностей частиц, приближенных к сферической форме [21]. Более мелкие же частицы НА, находясь

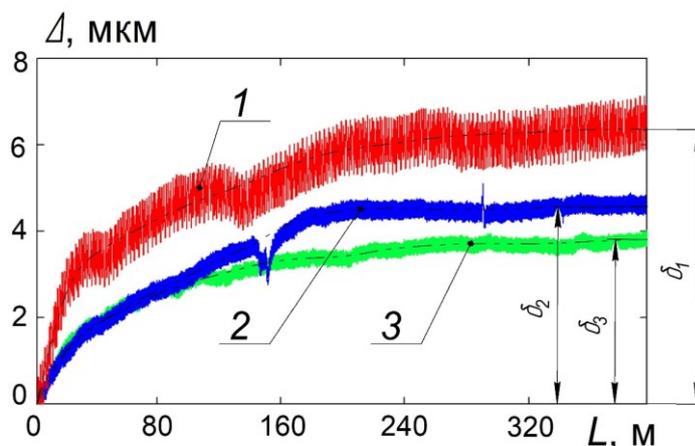


Рис. 3. Суммарный линейный износ элементов трибопары:
1 – базовая СОЖ; 2 – СОЖ + 0,5 % КНА-НС; 3 – СОЖ + 2,5 % КНА-НС

Fig. 3. Total linear wear of tribocouple elements:
1 – base cooling lubricant; 2 – cooling lubricant + 0.5 % of CND-NS; 3 – cooling lubricant + 2.5 % of CND-NS

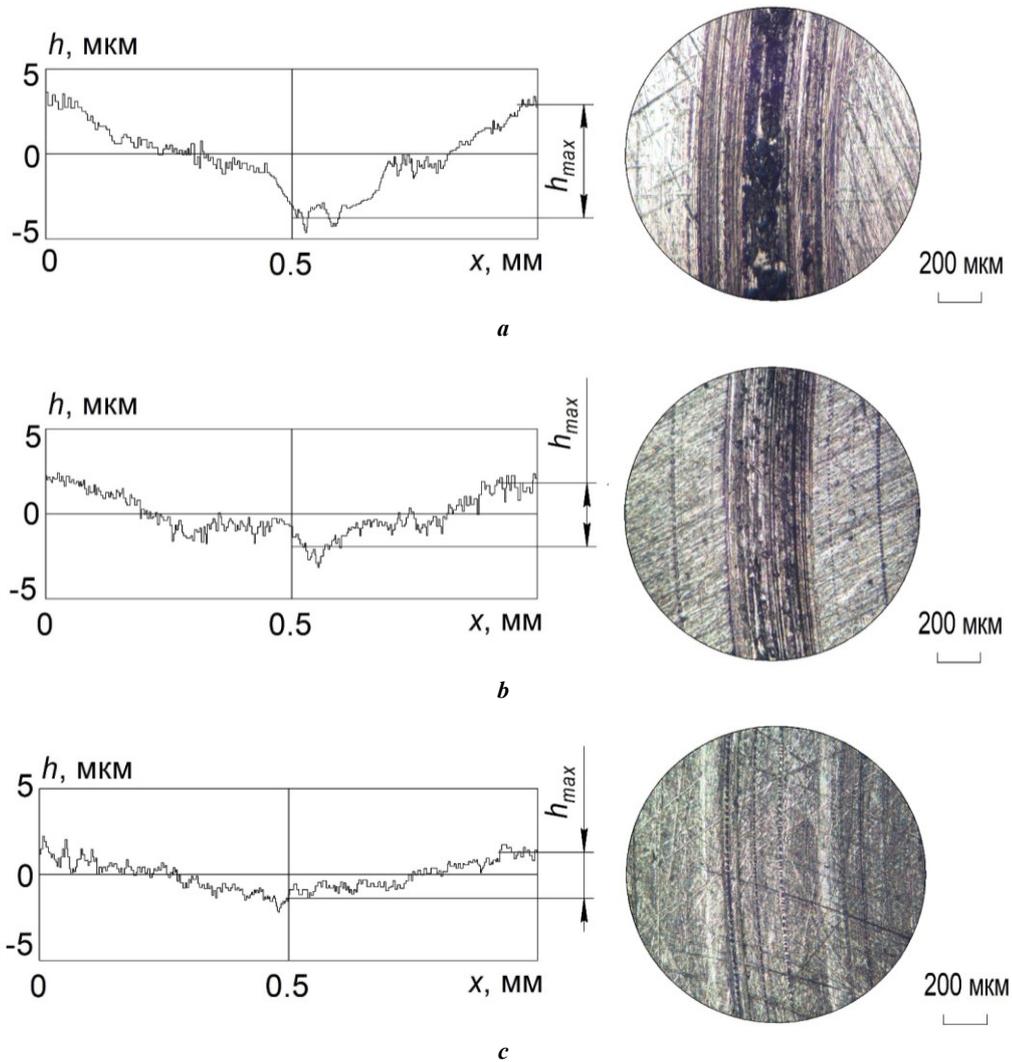


Рис. 4. Изношенные поверхности дисков при трении в различных средах: **a** – базовая СОЖ; **b** – СОЖ + 0,5 % КНА-НС; **c** – СОЖ + 2,5 % КНА-НС

Fig. 4. Worn surfaces of disks during friction in various environments: **a** – base cooling lubricant; **b** – cooling lubricant + 0.5 % of CNDA-NS; **c** – cooling lubricant + 2.5 % of CNDA-NS

в смазке и внедряясь в поверхностные микронеровности, могут оказывать полирующий эффект. При этом на участках поверхностей, разделенных смазочным материалом, присутствие НА приводит к формированию однородной и толстой трибопленки, которая снижает износ контактирующих тел [10; 21]. Данные механизмы воздействия на трибологические свойства смазочного материала доказаны для частиц, полученных детонационным методом; именно их чаще всего исследуют в качестве присадок [21]. В сравнении с КНА-НС эти НА обладают, как правило, более крупным диапазоном размеров. Таким образом, при добавлении детонационных НА в смазочном материале содержатся частицы, близкие к сферической (овальной) форме в пределах 5–10 нм. Для НА с диаметром в данном диапазоне шарикоподшипниковый эффект доказан в том числе путем молекулярного моделирования [12].

При введении значительно меньших по диаметру КНА-НС, характеризующихся при этом более высокой моносферностью, шарикоподшипниковый эффект от применения НА снижается, уступая место другим механизмам

воздействия. Алмазные частицы маленького диаметра (1–3 нм) будут легче заполнять поверхностные микронеровности и фиксироваться в них. Такого рода внедрение, с одной стороны, сохраняет от разрушения грани элементов трибопары за счет присутствия на них периодически регенерируемого защитного слоя из НА, с другой стороны, фрикционное взаимодействие поверхностей с твердыми включениями, сопровождающееся эффектом полирования, является причиной роста силы трения. Параллельно с этим происходит модификация частицами НА смазочной пленки, способствуя ее уплотнению, повышению устойчивости к истиранию и сдвигового сопротивления, что также приводит к росту коэффициента трения уже при добавлении 0,5 % КНА-НС.

Дальнейшее насыщение СОЖ наноалмазными частицами в еще большей степени усиливает эффект от противоизносного и полирующего воздействия КНА-НС. Повышение среднего коэффициента трения относительно концентрации 0,5 % в этом случае, учитывая значения границ доверительных интервалов, можно считать незначительным (таблица 1). Таким образом,

свойства, форма и размеры частиц кавитационных наноалмазов, а также их высокая монодисперсность позволяют достичь значительного противоизносного и полирующего (выглаживающего) эффектов при модификации ими СОЖ на водомасляной основе на фоне некоторого снижения антифрикционных показателей, что в целом делает применение КНА-НС в качестве противоизносной присадки перспективным.

ВЫВОДЫ

1. Добавление алмазных нанокластеров в исследуемую СОЖ на водной основе привело к существенному изменению трибологических характеристик системы трения. Модификация смазочных слоев способствовала повышению их несущей способности, что обеспечило снижение суммарного линейного износа элементов пары трения в 1,8 и 2,4 раза при концентрациях коллоидной дисперсии 0,5 и 2,5 % соответственно.

2. Промежуточные слои с содержанием КНА-НС повысили экранирующий эффект от смазочного материала в сравнении с базовым вариантом, снизив среднюю шероховатость дорожек трения в 1,4 и 1,6 раза, что говорит об улучшении качества поверхности после применения модифицированных СОЖ.

3. Добавление наноразмерных алмазов усилило противоизносные свойства смазочного материала. Снижение массовых потерь вращающегося контртела для концентраций коллоидной дисперсии 0,5 и 2,5 % составило 1,3 и 1,9 раза соответственно, для индентора – 1,2 и 1,5 раза. Наблюдаемое уменьшение износа элементов пары трения сопровождалось увеличением сдвигового сопротивления смазочного слоя, способствуя росту силы трения в системе в 1,4 раза уже при добавлении 0,5 % НА. Дальнейшее же повышение количества присадки до 2,5 % привело к незначительному приросту коэффициента трения относительно минимальной концентрации НА.

Использование наноалмазов кавитационного синтеза в качестве присадки в СОЖ на водомасляной основе может стать перспективным направлением для дальнейшего улучшения трибологических свойств и повышения их эксплуатационных характеристик. В качестве актуальных направлений дальнейших исследований в этой области рассматривается разработка новых составов СОЖ на базе исследованной коммерческой марки с добавлением нанокристаллических алмазов в различных концентрациях и последующие исследования эксплуатационных характеристик этих экспериментальных композиций при различных операциях резания металлов, обработке пластическим деформированием, накатке. Ожидаемыми эффектами от модификации СОЖ в этом случае станут повышение периода стойкости применяемых инструментов и улучшение качества микрорельефа обработанных поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chen Yan, Renner P., Liang Hong. Dispersion of Nanoparticles in Lubricating Oil: A Critical Review // *Lubricants*. 2019. Vol. 7. № 1. Article number 7. DOI: [10.3390/lubricants7010007](https://doi.org/10.3390/lubricants7010007).
- Gulzar M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Varman M., Zulkifli N.W.M., Mufti R.A., Zahid R. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives // *Journal of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18. Article number 223. DOI: [10.1007/s11051-016-3537-4](https://doi.org/10.1007/s11051-016-3537-4).
- Wenzhen Xia, Jingwei Zhao, Hui Wu et al. Effects of oil-in-water based nanolubricant containing TiO₂ nanoparticles in hot rolling of 304 stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 262. P. 149–156. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2018.06.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.020).
- Kim Hyun-Joon, Seo Kuk-Jin, Kang Kyeong Hee, Kim Dae-Eun. Nano-lubrication: A review // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016. Vol. 17. P. 829–841. DOI: [10.1007/s12541-016-0102-0](https://doi.org/10.1007/s12541-016-0102-0).
- Ali I., Basheer A.A., Kucherova A. et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 279. P. 251–266. DOI: [10.1016/j.molliq.2019.01.113](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113).
- Zhai Wenzheng, Srikanth N., Kong Ling Bing, Zhou Kun. Carbon nanomaterials in tribology // *Carbon*. 2017. Vol. 119. P. 150–171. DOI: [10.1016/j.carbon.2017.04.027](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.027).
- Gong Zhenbin, Shi Jing, Zhang Bin, Zhang Junyan. Graphene nano scrolls responding to superlow friction of amorphous carbon // *Carbon*. 2017. Vol. 116. P. 310–317. DOI: [10.1016/j.carbon.2017.01.106](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.106).
- Morshed A., Wu Hui, Jiang Zhengyi. A Comprehensive Review of Water-Based Nanolubricants // *Lubricants*. 2021. Vol. 9. Article number 89. DOI: [10.3390/lubricants9090089](https://doi.org/10.3390/lubricants9090089).
- Ivanov M., Shenderova O. Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2017. Vol. 21. № 1. P. 17–24. DOI: [10.1016/j.cossms.2016.07.003](https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.07.003).
- Piya A.K., Yang L., Omar A.A.S., Emami N., Morina A. Synergistic lubrication mechanism of nanodiamonds with organic friction modifier // *Carbon*. 2024. Vol. 218. Article number 118742. DOI: [10.1016/j.carbon.2023.118742](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118742).
- Shirani A., Nunn N., Shenderova O., Osawa E., Berman D. Nanodiamonds for improving lubrication of titanium surfaces in simulated body fluid // *Carbon*. 2019. Vol. 143. P. 890–896. DOI: [10.1016/j.carbon.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.12.005).
- Mirzaamiri R., Akbarzadeh S., Ziaei-Rad S., Shin Dong-Gap, Kim Dae-Eun. Molecular dynamics simulation and experimental investigation of tribological behavior of nanodiamonds in aqueous suspensions // *Tribology International*. 2021. Vol. 156. Article number 106838. DOI: [10.1016/j.triboint.2020.106838](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106838).
- Alias A.A., Kinoshita H., Fujii M. Tribological properties of diamond nanoparticle additive in water under a lubrication between steel plate and tungsten carbide ball // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2015. Vol. 9. № 1. Article number JAMDSM0006. DOI: [10.1299/jamdsm.2015jamdsm0006](https://doi.org/10.1299/jamdsm.2015jamdsm0006).
- Wu Pu, Chen Xinchun, Zhang Chenhui, Luo Jianbin. Synergistic tribological behaviors of graphene oxide and nanodiamond as lubricating additives in water // *Tribology International*. 2019. Vol. 132. P. 177–184. DOI: [10.1016/j.triboint.2018.12.021](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.021).
- Hu Shuguo, Li Changhe, Zhou Zongming et al. Nanoparticle-enhanced coolants in machining: mechanism, application, and prospects // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 18. Article number 53. DOI: [10.1007/s11465-023-0769-8](https://doi.org/10.1007/s11465-023-0769-8).
- Wang Xiaoming, Song Yuxiang, Lim Changhe et al. Nanofluids application in machining: a comprehensive re-

- view // *The International Journal of Advanced Manufacturing*. 2024. Vol. 131. P. 3113–3164. DOI: [10.1007/s00170-022-10767-2](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10767-2).
17. Kumar A.S., Deb S., Paul S. Tribological characteristics and micromilling performance of nanoparticle enhanced water based cutting fluids in minimum quantity lubrication // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 56. Part A. P. 766–776. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.05.032](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.032).
 18. Антипов А.А., Аракелян С.М., Гарнов С.В., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Ногтев Д.С., Осипов А.В. Лазерная абляция углеродных мишеней, помещенных в жидкость // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45. № 8. С. 731–735. EDN: [UGUZNP](https://www.edn.net/UGUZNP).
 19. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение. Минск: Беларуская навука, 2013. 381 с.
 20. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M. et al. Performance and mechanism of the structure formation and physical-mechanical properties of concrete by modification with nanodiamonds // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 452. Article number 138994. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.138994](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138994).
 21. Xia Yue, Lu Yunxiang, Yang Guoyong et al. Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology // *Materials*. 2023. Vol. 16. № 7. Article number 2710. DOI: [10.3390/ma16072710](https://doi.org/10.3390/ma16072710).
 9. Ivanov M., Shenderova O. Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 17–24. DOI: [10.1016/j.cossms.2016.07.003](https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.07.003).
 10. Piya A.K., Yang L., Omar A.A.S., Emami N., Morina A. Synergistic lubrication mechanism of nanodiamonds with organic friction modifier. *Carbon*, 2024, vol. 218, article number 118742. DOI: [10.1016/j.carbon.2023.118742](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118742).
 11. Shirani A., Nunn N., Shenderova O., Osawa E., Berman D. Nanodiamonds for improving lubrication of titanium surfaces in simulated body fluid. *Carbon*, 2019, vol. 143, pp. 890–896. DOI: [10.1016/j.carbon.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.12.005).
 12. Mirzaamiri R., Akbarzadeh S., Ziaei-Rad S., Shin Dong-Gap, Kim Dae-Eun. Molecular dynamics simulation and experimental investigation of tribological behavior of nanodiamonds in aqueous suspensions. *Tribology International*, 2021, vol. 156, article number 106838. DOI: [10.1016/j.triboint.2020.106838](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106838).
 13. Alias A.A., Kinoshita H., Fujii M. Tribological properties of diamond nanoparticle additive in water under a lubrication between steel plate and tungsten carbide ball. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2015, vol. 9, no. 1, article number JAMDSM0006. DOI: [10.1299/jamdsm.2015jamdsm0006](https://doi.org/10.1299/jamdsm.2015jamdsm0006).
 14. Wu Pu, Chen Xinchun, Zhang Chenhui, Luo Jianbin. Synergistic tribological behaviors of graphene oxide and nanodiamond as lubricating additives in water. *Tribology International*, 2019, vol. 132, pp. 177–184. DOI: [10.1016/j.triboint.2018.12.021](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.021).
 15. Hu Shuguo, Li Changhe, Zhou Zongming et al. Nanoparticle-enhanced coolants in machining: mechanism, application, and prospects. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 18, article number 53. DOI: [10.1007/s11465-023-0769-8](https://doi.org/10.1007/s11465-023-0769-8).
 16. Wang Xiaoming, Song Yuxiang, Lim Changhe et al. Nanofluids application in machining: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing*, 2024, vol. 131, pp. 3113–3164. DOI: [10.1007/s00170-022-10767-2](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10767-2).
 17. Kumar A.S., Deb S., Paul S. Tribological characteristics and micromilling performance of nanoparticle enhanced water based cutting fluids in minimum quantity lubrication. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 56, part A, pp. 766–776. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.05.032](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.032).
 18. Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Nogtev D.S., Osipov A.V., Garnov S.V. Laser ablation of carbon targets placed in a liquid. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 8, pp. 731–735. DOI: [10.1070/QE2015v045n08ABEH015681](https://doi.org/10.1070/QE2015v045n08ABEH015681).
 19. Vityaz P.A. *Nanoalmazny detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primeneniye* [Detonation synthesis nanodiamonds: production and application]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 381 p.
 20. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M. et al. Performance and mechanism of the structure formation and physical-mechanical properties of concrete by modification with nanodiamonds. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 452, article number 138994. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.138994](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138994).
 21. Xia Yue, Lu Yunxiang, Yang Guoyong et al. Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 7, article number 2710. DOI: [10.3390/ma16072710](https://doi.org/10.3390/ma16072710).

REFERENCES

1. Chen Yan, Renner P., Liang Hong. Dispersion of Nanoparticles in Lubricating Oil: A Critical Review. *Lubricants*, 2019, vol. 7, no. 1, article number 7. DOI: [10.3390/lubricants7010007](https://doi.org/10.3390/lubricants7010007).
2. Gulzar M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Varman M., Zulkifli N.W.M., Mufti R.A., Zahid R. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research*, 2016, vol. 18, article number 223. DOI: [10.1007/s11051-016-3537-4](https://doi.org/10.1007/s11051-016-3537-4).
3. Xia Wenzhen, Zhao Jingwei, Wu Hui et al. Effects of oil-in-water based nanolubricant containing TiO₂ nanoparticles in hot rolling of 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 262, pp. 149–156. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2018.06.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.020).
4. Kim Hyun-Joon, Seo Kuk-Jin, Kang Kyeong Hee, Kim Dae-Eun. Nano-lubrication: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, vol. 17, pp. 829–841. DOI: [10.1007/s12541-016-0102-0](https://doi.org/10.1007/s12541-016-0102-0).
5. Ali I., Basheer A.A., Kucherova A. et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 279, pp. 251–266. DOI: [10.1016/j.molliq.2019.01.113](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113).
6. Zhai Wenzheng, Srikanth N., Kong Ling Bing, Zhou Kun. Carbon nanomaterials in tribology. *Carbon*, 2017, vol. 119, pp. 150–171. DOI: [10.1016/j.carbon.2017.04.027](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.027).
7. Gong Zhenbin, Shi Jing, Zhang Bin, Zhang Junyan. Graphene nano scrolls responding to superlow friction of amorphous carbon. *Carbon*, 2017, vol. 116, pp. 310–317. DOI: [10.1016/j.carbon.2017.01.106](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.106).
8. Morshed A., Wu Hui, Jiang Zhengyi. A Comprehensive Review of Water-Based Nanolubricants. *Lubricants*, 2021, vol. 9, article number 89. DOI: [10.3390/lubricants9090089](https://doi.org/10.3390/lubricants9090089).

The influence of cavitation synthesis nanodiamonds on the tribological properties of a water-oil-based cooling lubricant

Evgeny V. Fominov^{*1,3}, PhD (Engineering), Associate Professor

Maksim V. Kovtun^{2,4}, Head of Research and Technology Center

Sergey A. Kurlovich^{2,5}, Director

Dmitry I. Gladkikh^{1,6}, postgraduate student

Tatyana V. Lavrenova^{1,7}, senior lecturer

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don (Russia)

²Trading and Industrial Company SYNTEZ, Rostov-on-Don (Russia)

*E-mail: fominoff83@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1489-8333>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3606-6311>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-256X>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-7730>

Received 20.02.2025

Revised 08.04.2025

Accepted 06.05.2025

Abstract: This paper deals with the study of the influence of nanosized diamonds produced by the cavitation synthesis method on the tribological properties of a commercial water-oil-based cooling lubricant. The study is aimed at assessing the prospects for application of this type of nanodiamonds as an antifriction and antiwear additive. Tribological tests were carried out using the “indenter on a disk” friction scheme at a constant load and sliding speed. High-speed P18 steel for the indenter and 30HGSA steel for the rotating counterbody (disk) were used as friction couple materials. The studies were carried out for the base lubricant and two variants of its composition modifications using colloidal dispersion (distilled water with dispersed nanodiamonds) with a final additive concentration of 0.5 and 2.5 %. It was experimentally found that both variants of modification of the base water-oil emulsion resulted in increase of the bearing capacity of lubricating layers, decreasing the total linear wear of friction couple elements by 1.8–2.4 times. The presence of nanodiamonds in the composition enhanced as well the shielding effect of the cutting coolant. A decrease in visible damage to friction surfaces was recorded using optical microscopy. Analysis of profile diagrams of worn areas in the transverse direction showed a decrease in the size of a groove on the counterbody against the background of a decrease in roughness from $Ra=0.49\ \mu\text{m}$ in the basic variant to $Ra=0.29\text{--}0.34\ \mu\text{m}$. Evaluation of the loss in counterbody weight for nanodiamond concentrations of 0.5 and 2.5 % showed a decrease in their value by 1.3 and 1.9 times, respectively; for the indenter, the decrease in this parameter was 1.2 and 1.5 times. Thus, the use of cavitation synthesis nanodiamonds as an additive may become a promising direction for increasing the antiwear properties of water-oil-based cooling lubricants.

Keywords: cavitation synthesis nanodiamonds; water-oil emulsion; cooling lubricant; boundary friction; wear resistance; friction ratio.

For citation: Fominov E.V., Kovtun M.V., Kurlovich S.A., Gladkikh D.I., Lavrenova T.V. The influence of cavitation synthesis nanodiamonds on the tribological properties of a water-oil-based cooling lubricant. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 2, pp. 87–94. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-7.