
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 629.3.014

**ОПЫТ ОБКАТКИ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ И РЕДУКТОРА БУРОВОЙ
УСТАНОВКИ С ПОРОШКОМ НАНОСТРУКТУРНОГО БЕМИТА**© 2021 г. А. В. Федотов^{1,*}, А. А. Гвоздев², А. В. Дунаев¹, Н. Н. Сергеев³, О. В. Бармина⁴¹ *Федеральный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия*² *Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева, Иваново, Россия*³ *Рязанское отделение Федерального агроинженерного центра ВИМ, Рязань, Россия*⁴ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: fedotov48@list.ru*

Поступила в редакцию 09.11.2020 г.

После доработки 21.01.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Исследованы добавки к смазочным маслам на основе наноструктурного бемита для обкатки дизеля Д-243 и редуктора буровой установки. Показано, что ввод в моторное масло М-10Г₂к порошка бемита и поверхностно активного вещества до двух раз ускоряет и повышает качество приработки дизеля, обеспечивая быстрое достижение паспортных значений мощности и расхода топлива. Композиция, содержащая порошки каолина, талька, бемита и поверхностно активного вещества сокращает продолжительность обкатки редуктора буровой установки в 2.5 раза. Проведен анализ процессов, происходящих при обкатке двигателя и редуктора с разработанными добавками. Предположено, что эффективность обкатки зависит не только от физико-химических свойств компонентов добавки, но и от соотношения размера частиц компонентов и шероховатости поверхности притираемых деталей.

Ключевые слова: обкатка, приработка, бемит, каолин, тальк, поверхностно активное вещество, шероховатость, износ

DOI: 10.31857/S0235711921030032

Постановка проблемы. Завершающей операцией в капитальном ремонте агрегатов сложных по конструкции технических объектов является обкатка, которая позволяет проверить их исправность и качество ремонта агрегатов. Происходящая при обкатке приработка обеспечивает притирку сопряжений трения, подготовку их к восприятию эксплуатационных нагрузок, предотвращает повышенное изнашивание в эксплуатации, увеличивает послеремонтный срок службы агрегатов.

Одними из сложных и ответственных агрегатов, кроме ДВС, являются агрегаты трансмиссии: ведущие мосты, коробки передач, промышленные редукторы. В соответствии с нормативно-технической документацией заводы и ремонтные предприятия обязаны подвергать эти агрегаты обкатке с приработкой и приемо-сдаточным испытаниям. Однако обычно приработку проводят только при обкатке за 0.5–1.5 ч, в результате чего основная часть приработки переносится на начальную эксплуатацию. Вынужденная работа узлов и агрегатов на эксплуатационных нагрузках с не полностью приработанными деталями может приводить к их повышенному износу, возможно образованию схватывания и задира поверхностей, а в итоге – снижение межремонтного ресурса.

По этой теме во многих странах проведены разнообразные исследования режимов обкатки и испытаний, процессов, происходящих на поверхностях трения при разных этапах приработки, способов управления этими процессами, а особенно много иссле-

дований по применяемым приработочным, притирочным материалам, а также по приработочным маслам [1–4]. Основная масса исследований проведена для обкатки ДВС, а для остальных узлов и агрегатов таких исследований меньше [5, 6]. Но во всех исследованиях ставилась задача интенсификации механических, физических и химических процессов на поверхностях трения с минимумом приработочного износа.

Для ускорения процесса приработки применяют специальные обкаточные масла или вводят в товарные масла различные по механизму действия триботехнические составы (добавки). По нашему мнению, для обкатки двигателей и узлов трансмиссии можно применять наноструктурный оксигидроксид алюминия (бемит). Подобно каолину, который применяется для обкатки, бемит, являясь мягким абразивом (твердость по шкале Мооса около 3.5), может быть перспективным материалом.

Цель исследований – оценка эффективности применения наноструктурного бемита и других веществ для обкатки двигателей и агрегатов трансмиссии.

Материалы и методы исследования. В работе использовали порошок наноструктурного бемита, полученный методом гидротермального синтеза из промышленных порошков алюминия марки АД-4 [7]. Отличительной особенностью бемита, полученного таким методом, является высокая степень его однородности, стабильность состава и структуры разных партий. Использованный порошок имеет следующие характеристики: 1) твердость по минералогической шкале 3.5; 2) потери при прокаливании 15%; 3) плотность, кажущаяся 3.07 г/см^3 ; 4) размер кристаллов 70 нм; 5) удельная поверхность $70 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для приготовления трибосостава для обкатки двигателя порошок бемита растирали в олеиновой кислоте, перемешивали с минеральным маслом, суспензию обрабатывали ультразвуком и вводили в картер дизеля Д-243, содержащий 15 л моторного масла М-10Г₂к, из расчета содержания порошка бемита и поверхностно активного вещества (ПАВ) в картерном масле по 0.76 мас. %.

Обкатку дизеля без/с трибосоставом проводили одинаково по стандартной технологии на модернизированном обкаточно-тормозном стенде КИ-3540-ГОСНИТИ. К каждой обкатке дизель собирали с новыми деталями цилиндропоршневой группы, новыми втулками верхней головки и вкладышами шатуна.

Шероховатость поверхностей вкладышей подшипников дизеля и поршневых колец проверяли до и после приработки профилометром “Surtronic-3P” фирмы “Тейлор–Гобсон” (Англия). Износ сопряжений двигателя на различных стадиях приработки оценивали по массовой доле механических примесей в моторном масле, пробы которого по 300 г брали через 3 мин после начала холодной приработки, после холодной приработки, после горячей приработки и после испытания на износостойкость. Система сбора информации позволяла регистрировать во времени компрессию, характер изменения частоты вращения вала двигателя, момент на валу, давление масла в системе смазки, температуру масла и воды, расход картерных газов и топлива.

Для приготовления трибосостава для приработки сопряжений трения редуктора буровой установки, устанавливаемой на шасси автомобиля ГАЗ, дополнительно к наноструктурному бемиту использовали каолин Просяновского месторождения по ТУ 421-533-2001, тальк Шабровского месторождения марки ТМК-28 и олеат меди (готовили смешиванием олеиновой кислоты и хлорокси меди). Компоненты сушили, готовили смесь, которую измельчали два часа в шаровой мельнице. Далее порошок перемешивали в смесителе Вернера с минеральным дизельным отработанным маслом, принятым как базовое масло (БМ), и обрабатывали ультразвуком при частоте 35 кГц в течение 20–25 мин до образования гомогенной суспензии добавки. По стандартной технологии обкатки в редуктор заливали 10 л трансмиссионного масла ТМ-3.

Редуктор с трибосоставом перед обкаткой вводили в картер редуктора с 10 л минерального дизельного отработанного масла из расчета содержания каолина, талька, бемита и ПАВ в приработочном масле редуктора в пределах, мас. %: 0.3–0.6; 0.2–0.4; 0.1–0.3, 0.06–0.08 соответственно, после чего производили обкатку редуктора по стандартной технологии.

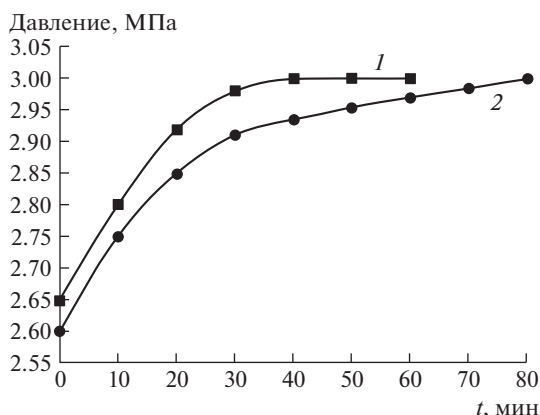


Рис. 1. Динамика компрессии при приработке дизеля [8]: 1 – с добавкой бемита; 2 – без добавки бемита.

Привод обкатываемого редуктора буровой установки осуществляли асинхронным электродвигателем мощностью 7.5 кВт с частотой вращения 750 мин^{-1} . Во всех случаях окончание приработки определяли по снижению шума зубчатых передач и качеству сформированного контакта зубьев осмотром при вскрытии боковых крышек редуктора.

Для сравнительных исследований испытывали несколько новых составов: реметаллизант “Ресурс” (РМ) и геомодификатор трения “Форсан” (ГМТ), рекомендуемых производителями и для обкатки агрегатов.

Лабораторные испытания перечисленных составов проводили на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме “ролик–самоустанавливающаяся колодка”. Их материалы, соответственно, сталь 40Х и сталь 45 с твердостью 50–55 НRC, шлифованные до $R_a = 0.32–0.63 \text{ мкм}$. Режим испытаний: частота вращения ролика 400 мин^{-1} , в первые пятнадцать минут испытаний нагружение возрастало ступенчато с интервалом по пять минут: 1000 Н, 1250 Н, 1500 Н с ростом момента трения; во вторые пятнадцать минут нагрузка оставалась постоянной 1500 Н и шла стабилизация момента трения. Нижняя часть ролика на 1/3 была погружена в смазочную композицию. В ходе испытаний велась запись момента трения и измерялась температура масла. Продолжительность испытания каждого состава составляла 30 мин (адаптировано к техническим требованиям на обкатку агрегатов трансмиссии) с трехкратной повторностью опытов.

Результаты исследований и обсуждение. Испытания дизеля Д-243 показали, что добавка бемита способствовала ускорению приработки сопряжений “гильза–кольцо” (рис. 1) [8]. Так компрессия стабилизировалась через тридцать минут при 3.0 МПа, а без добавки – только на 80-й минуте.

Через шестьдесят минут приработки износ первого компрессионного кольца с использованием бемита был меньше в два раза, расход картерных газов меньше в 1.6 раза, а температура масла ниже на $15–20^\circ\text{C}$. Максимальная эффективная мощность дизеля, приработанного в течение 90 мин на масле с бемитом, составила 52.5 кВт, удельный расход топлива – 257 г/л.с.ч., что близко к показателям дизеля после 50–100 ч работы. А при обкатке на товарном масле в течение тех же 90 мин наибольшая эффективная мощность была около 45 кВт, а расход топлива около 270 г/л.с.ч. После 120 мин работы дизеля износ первого компрессионного кольца оказался меньше в 2.5 раза, расход картерных газов на 12.7%, а масла на 27%.

При этом шероховатость шатунных и коренных вкладышей в приработке с бемитом, из-за их мягкости, увеличилась, а поршневых колец – уменьшилась (рис. 2). Обе шероховатости после приработки без добавки больше чем с добавкой: у шатунных

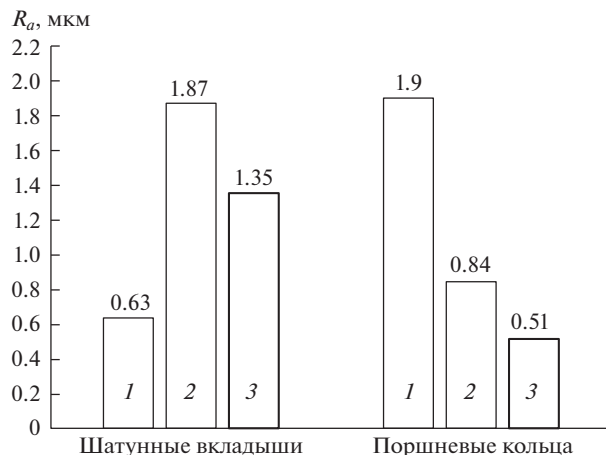


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхностей деталей при разных приемах приработки: 1 – до приработки; 2 – после приработки без добавки; 3 – после приработки с добавкой бемита.

вкладышей с типовой приработкой – 1.87 мкм, а с добавкой – 1.35 мкм (т.е. в 1.38 раза меньше), у поршневых колец, соответственно 0.84 и 0.51 мкм (т.е. в 1.7 раза меньше).

Изменение шероховатости при приработке шатунных вкладышей и поршневых колец происходит по-разному, т.к. приработка не просто обеспечивает уменьшение шероховатости, но и обеспечивает в конкретных сопряжениях ее оптимальное значение [7, 8]. Происходит переформирование поверхностей и изменение их физико-механических свойств до равновесных значений. Ее достижение приводит к снижению скорости изнашивания, коэффициента трения и тепловыделения.

В целом ввод бемита в моторное масло дизеля Д-243 уменьшил время его полной приработки, повысил износостойкость сопряжений на 22%, уменьшил приработочный износ на 5.8%, износ первого компрессионного кольца в 2.5 раза, расход картерных газов на 12.7%.

Следует отметить, что для официальных рекомендаций по применению наноструктурного бемита AlO(OH) производства ГОСНИТИ для обкатки тракторных, особенно импортных, дизелей в ремонтном производстве все же требуются дополнительные сравнительные испытания с существующими обкаточными материалами.

Принимая во внимание положения трибологии, роль бемита в трибосреде со стандартными смазками можно свести к следующему: 1) абразивное изнашивание и подшлифовка зон повышенной шероховатости сопряжений трения, повышение чистоты поверхностей, снижение механической составляющей коэффициента трения; 2) очистка поверхностей трения от наслоений, оксидных пленок и дефектных структур, что обеспечивает доступ веществ трибосреды к ювенильным поверхностям металлов и ускоряет образование антифрикционных покрытий; 3) некоторая последующая адсорбция на поверхностях частиц бемита смолистых веществ, что создает частицы, разделяющие детали (“третьи тела” в трибопаре), уменьшающие коэффициент трения.

Разработанная добавка кроме мягкого абразивного трения осуществляет адсорбционное снижение прочности и пластифицирование трущихся поверхностей воздействием ПАВ (эффект академика П.А. Ребиндера).

Результаты испытаний показали, что применение наноструктурного бемита в обкаточном составе для приработки двигателей повышает нагрузочную способность пары трения на 16–17%, снижает коэффициент трения на 10–30%, а теплонапряженность

Таблица 1. Показатели процесса приработки исследуемых образцов

Смазочный состав	Момент трения, в начале/в конце $M_{тр. нач}/M_{тр. кон}$	Скорость изменения момента трения, Н см/мин	Температура в конце опыта, °С	Площадь приработанной поверхности, %
БМ	230/215	1.00	74.5	30–35
БМ+РМ	195/175	1.33	72.8	40–45
БМ+ГМТ	225/190	2.33	64.2	65–70
БМ+ЭК	245/195	3.33	61.4	75–80

Примечание. БМ – базовое масло марки ТМ-3; РМ – реметаллизант марки “Ресурс”; ГМТ – геомодификатор трения; ЭК – экспериментальный состав.

узлов трения на 6–15%. Разработаны и рекомендации по обкатке ДВС с использованием наноструктурного бемита.

Притирочная добавка на основе наноструктурного бемита хорошо зарекомендовала себя в условиях приработки деталей ДВС с твердостью 52–56 HRC и 10–11 классом чистоты. Зубья зубчатых колес в трансмиссиях (стали типа 18ХГТ) и подшипники качения (стали типа ШХ-15) имеют твердость 179–207 МПа или 61–63 HRC при классе чистоты 7–8 с шероховатостью Rz 3.2–6.0 мкм. Нанодисперсность частиц бемита (размер кристаллов менее 100 нм, агрегатов менее 1 мкм) приводит к их вдавливанию в глубокие впадины шероховатостей грубых поверхностей зубьев зубчатых колес и, видимо, поэтому абразивность порошка бемита в агрегатах трансмиссий оказалась слабой. Кроме того, в условиях трения и повышенной температуры в точках контакта бемит может разлагаться с выделением воды и образованием безводных форм оксидов алюминия. При этом происходит самоизмельчение исходных кристаллов и агрегатов, что еще больше уменьшает их размер [9]. Температура, соответствующая образованию частиц минимального размера, составляет около 500°С.

Исходя из этого для приработки агрегатов трансмиссии была разработана добавка, содержащая наноструктурный бемит, ПАВ, тальк и каолин. В ходе предварительных исследований была найдена область оптимальных количеств ингредиентов комплексной добавки, при этом функциями отклика в испытаниях служили: скорость снижения (стабилизации) момента трения, температуры, площадь приработанной поверхности (доля в геометрической площади контакта) в равных условиях испытаний по нагрузке, скорости скольжения и времени испытаний.

Результаты испытания экспериментального состава в сравнении с результатами испытаний известных притирочных составов показали ускорение приработки, снижение температуры смазки, увеличение площади приработанной поверхности деталей (табл. 1).

Производственные испытания разработанной приработочной добавки провели на редукторе мобильной буровой установки. Его конструктивной особенностью является наличие высокотвердых зубчатых колес, опорных подшипников, отсутствие цветных металлов и мягких сплавов. Введение в композицию повышенного количества (до 2-х раз в сравнении с добавкой для обкатки ДВС) абразивов умеренной твердости (каолин, тальк, бемит) и ПАВ, обладающего дезагрегирующими свойствами, повышающего седиментационную устойчивость композиции и обеспечивающего эффект П.А. Ребиндера привело к ускорению приработки.

Получено сокращение длительности обкатки редуктора в 2.5 раза по сравнению с обкаткой на штатном трансмиссионном масле ТМ-3. Добавка позволяет эффективно приработать детали, сформировать полное пятно контакта в зацеплении зубьев зубчатых колес, шлицевых валов и подшипников. А после слива обкаточного масла и заправки штатного заметно снизился шум, нагрев корпуса, что предполагает повышенный ресурс редуктора.

Положительный эффект добавок каолина и талька видимо обусловлен также соответствующими для приработки зубчатых колес их физико-механическими свойствами и

размерами частиц (единицы мкм), сопоставимыми с размерами неровностей поверхностей деталей редуктора. Они термически более стабильны и не разлагаются при температурах 400–500°C, как бемит с образованием более мелких частиц. Частицы талька и каолина истирают микронеровности трущихся поверхностей, увеличивая площадь опорной поверхности контакта, снижая удельные нагрузки и препятствуя тем самым появлению задиров. Попадая между трущимися деталями, нивелируя поверхности, они могут адсорбировать смолистые и окисленные продукты среды. Каолин с более крупными частицами активно участвует в абразивной притирке поверхностей зубьев зубчатых колес, открывает ювенильные их поверхности и способствует более активному действию ПАВ по эффекту академика П.А. Ребиндера. Тальк, как пластичный, дисперсный порошок, служит промежуточным материалом между частицами каолина и вместе с бемитом способствует более равномерному распределению частиц каолина в притирочной композиции и в приработочном масле.

Заключение. Ввод в масла бемита до 2-х раз ускоряет и повышает качество приработки ДВС, обеспечивает быстрое достижение паспортных значений мощности и расхода топлива. Разработанная приработочная композиция для обкатки редукторов, содержащая каолин, тальк, бемит и ПАВ обеспечивает сокращение длительности их обкатки в 2.5 раза. Эффективность приработки зависит не только от физико-механических свойств компонентов добавки, но и от соотношения размера частиц компонентов и шероховатости поверхности прирабатываемых деталей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.613.21.0004 от 22.08.2014 г. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI61314X0004).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгополов К.Н., Потеха В.Л., Любимов Д.Н. Трибология геомодифицированных смазочных материалов: Монография. Гродно: ГГАУ. 2013. 430 с.
2. Дунаев А.В., Лялякин В.П., Соловьев Р.Ю. Технологические рекомендации по повышению ресурса агрегатов тракторов ремонтно-восстановительными добавками к смазочным маслам. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2013. 96 с.
3. Лазарев С.Ю. О концептуальных вопросах исследований в области трибологии природных минеральных материалов // М.: Труды ГОСНИТИ, 2016. Т. 124. Ч. 2. С. 47.
4. Лялякин В.П., Соловьев Р.Ю., Ольховацкий А.К., Гительман Д.А. Повышение послеремонтной безотказности отремонтированных ДВС и трансмиссий применением наноматериалов // М.: Труды ГОСНИТИ, 2013. Т. 113. С. 90.
5. Белый И.Ф., Меркулов А.Ф., Белый В.И., Голубев И.Г. Эффективное использование антифрикционных добавок к трансмиссионным и моторным маслам. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2011. 52 с.
6. Четев В.А. Избирательный способ ремонта агрегатов машин // М.: Труды ГОСНИТИ, 2011. Т. 107. Ч. 2. С. 3.
7. Берш А.В., Иванов Ю.Л., Мазалов Ю.А., Глухов А.В., Трубочев О.А. Способ получения гидроксидов или оксидов алюминия и водорода. Патент 2278077. 2006.
8. Мазалов Ю.А., Соловьев Р.Ю., Сергеев Н.Н., Федотов А.В., Дунаев А.В., Витязь П.А., Судник Л.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурного бемита // Трение и износ, 2015. Т. 36. № 6. С. 627.
9. Bersh A.V., Mazalov D.Yu., Solov'ev R.Yu., Sudnik L.V., Fedotov A.V. Nanostructured Disaggregated Aluminum Hydroxide and Oxide Powders // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. V. 57. P. 364.