

УДК 621.9

## НАНОТЕХНОЛОГИИ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

З. Д. ГАРБАРЬ

Научный руководитель С. В. БАНАД

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Интеграция нанотехнологий в автомобилестроение обеспечивает значительный прогресс в повышении эффективности, надежности и экологичности транспортных средств, особенно в критических узлах. Основной фактор потерь энергии в ДВС (до 15 % от мощности) – механическое трение в сопряженных деталях. Нанотехнологии минимизируют эти потери через два подхода: наномодифицированные смазочные материалы и твердые нанопокрытия. Инкорпорация в базовые масла наночастиц дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), алмаза, диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), оксида цинка ( $\text{ZnO}$ ) или политетрафторэтилена (ПТФЭ) размером 10...100 нм позволяет им функционировать как твердотельные трибологические агенты. Их действие включает заполнение микродефектов на поверхностях трущихся пар (цилиндр – кольцо, подшипники скольжения), сглаживание микронеровностей, формирование на поверхности деталей адсорбированной или химически связанной наноструктурированной пленки с низким коэффициентом трения и высокой стойкостью к срезающим нагрузкам, а также стабилизацию вязкостно-температурных характеристик масла.

Экспериментальные исследования, проведенные на двигателе ГАЗ-3110 (модель 402-1), выявили перспективность применения ультрадисперсных алмазов (УА) в качестве универсального модификатора трения. УА синтезируются в детонационной волне и представляют нанодисперсию алмаз – графит с размером частиц 4...8 нм, что в 1000 раз меньше микронеровностей трущихся поверхностей. При введении в минеральное моторное масло («ЛУКОЙЛ Стандарт») УА формируют на поверхностях гильз, поршневых колец и поршней диффузионно-наклепанный слой, аналогичный упрочнению при механическом наклепе. Этот слой повышает микротвердость поверхностей, сглаживает микрорельеф до зеркального состояния и нейтрализует «водородный износ» (явление, открытое Д. Н. Гаркуновым), предотвращая концентрацию протонов водорода в зонах нагрева. Кроме того, УА блокируют проявление эффекта Ребиндера (снижение прочности из-за адсорбции ПАВ), т. к. их химическая инертность препятствует взаимодействию с активными присадками. Частицы УА, будучи диэлектриками, электризуются при трении с

чугуном гильз, образуя диполи, которые рассеиваются по поверхности, а их малый размер (сопоставимый с молекулой оливкового масла – 1,7 нм) исключает задержку в масляных фильтрах. Результатом является снижение коэффициента трения на 15 %...30 %, уменьшение износа деталей цилиндропоршневой группы на 20 %...50 %, повышение механического КПД двигателя и снижение расхода топлива на 2 %...5 %. Компании Ford и Toyota внедряют такие масла в серийные модели. Более радикальный подход – нанесение ультратонких (1...5 мкм) износостойких покрытий с наноразмерной структурой на высоконагруженные детали методами PVD (Physical Vapor Deposition) или CVD (Chemical Vapor Deposition). Алмазоподобный углерод (DLC) – аморфная углеродная пленка с сочетанием  $sp^3$  и  $sp^2$  связей – обладает высокой твердостью (2000...4000 HV) и низким коэффициентом трения (0,05...0,15). Компания BMW активно применяет DLC-покрытия на поршневых кольцах своих бензиновых (серия B48/B58) и дизельных двигателей, что снижает трение в паре кольцо – гильза, повышает стойкость к задирам и увеличивает ресурс гильз цилиндров. Другие эффективные покрытия включают нитрид титана (TiN), нитрид хрома (CrN), нитрид алюминия-титана (AlTiN) с высокой твердостью (1800...3500 HV), термостойкостью и коррозионной стойкостью, применяемые на кулачках распредвалов, толкателях, клапанах, деталях ТНВД и турбокомпрессоров. Плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО)/Micro Arc Oxidation (MAO) формирует толстый (до 200 мкм) керамический слой ( $\alpha$ - $Al_2O_3$ ) с нанопористой структурой на алюминиевых поршнях, обеспечивая высокую твердость (до 2000 HV) и термостойкость.

Принципы снижения трения и износа, реализованные в двигателе, напрямую переносятся на трансмиссию для повышения ее эффективности и надежности. Наномодифицированные масла снижают потери в зубчатых зацеплениях коробок передач (особенно АКПП и вариаторов), подшипниках качения и скольжения, дифференциалах, улучшая противозадирные свойства (EP) и предотвращая питтинг (ямочная коррозия) и заедание. Твердые нанопокрывтия (DLC, CrN), наносимые на синхронизаторы, зубья шестерен, валы и вилки переключения, повышают стойкость к усталостному выкрашиванию (питтингу), абразивному и адгезионному износу, снижая шумность работы. Компания ZF применяет подобные покрытия в своих преселективных коробках передач. Оптимизация контакта с дорожным полотном достигается за счет нанотехнологий в шинах, где протектор на основе нанокомпозитов решает задачу баланса противоречивых требований. Использование наноструктурированной силики ( $SiO_2$  с частицами 10...50 нм) вместо сажи, с применением силановых связующих агентов (например, Si 69), является стандартом для

современных энергоэффективных шин. Это обеспечивает снижение сопротивления качению за счет уменьшения гистерезисных потерь в резиновой матрице благодаря более равномерному распределению наночастиц и прочной связи полимер – наполнитель, что снижает расход топлива на 5 %...7 %. Одновременно наночастицы силики повышают сцепление на мокрой дороге за счет оптимизации микрошероховатости протектора, сохраняя при этом уровень износостойкости сажевых шин. Компания Michelin широко использует эту технологию (Green X) в шинах, таких как MICHELIN ENERGY SAVER. Перспективные направления включают применение графена для улучшения теплопроводности и прочности (концепты Goodyear Eagle-360 Urban) и модифицированных наноглин для снижения проницаемости.

В подвеске нанотехнологии способствуют повышению комфорта, управляемости и долговечности. Нанесение низкофрикционных покрытий на основе DLC или модифицированного PTFE на штоки амортизаторов и пальцы шарниров подвески снижает трение скольжения и stiction (статическое трение). Это улучшает реакцию амортизаторов, особенно в адаптивных системах (например, MagneRide от GM или CDC от ZF/Sachs), и увеличивает ресурс уплотнений и направляющих. Использование полимерных нанокомпозитов (полиамиды или полиуретаны, армированные наноглиной или нанотальком) для изготовления сайлент-блоков, втулок и защитных чехлов обеспечивает улучшенные механические свойства (прочность, жесткость, усталостная долговечность) и стойкость к агрессивным средам при снижении массы. Несмотря на доказанные преимущества, такие как снижение механических потерь в двигателях BMW с DLC-покрытиями поршневых колец, повышение топливной экономичности шин Michelin с наноструктурированной силикой, улучшение отклика подвески, внедрение сдерживается высокой стоимостью синтеза и обработки наноматериалов (графен, УНТ), а также процессов нанесения покрытий (PVD/CVD). Обеспечение стабильности свойств нанокомпозитов и воспроизводимости характеристик покрытий в массовом производстве требует решения сложных инженерных задач. Ключевыми остаются вопросы подтверждения долговечности в экстремальных условиях эксплуатации и разработки эффективных методов разделения и утилизации нанокомпонентов по окончании жизненного цикла автомобиля. Дальнейшее развитие направлено на снижение стоимости, оптимизацию технологий нанесения и создание устойчивых систем рециклинга.