

личина соответственно равнялась 109,8 и 14,7 мм/км. При нагрузке 8 МПа интенсивность изнашивания ЛМКМ 1-й группы соответствовала интенсивности изнашивания литых бронз БрОЦС5-5-5 и БрОФ10-1 и находилась в пределах 5,0–8,2 мм/км. С увеличением концентрации легирующих элементов в матрице интенсивность изнашивания ЛМКМ уменьшалась ($\epsilon = 0,4 \dots 1,5$ мм/км) за счет образования интерметаллидов на границе контакта фаз. Литые композиционные материалы, упрочненные термообработанными или износостойкими чугунами гранулами, при этих режимах испытаний имели интенсивность изнашивания $\epsilon = 0,035 \dots 0,048$ мм/км и в 6–7 раз превосходили по износостойкости закаленную сталь.

Уменьшение нагрузки до 2 МПа качественно изменило характер соотношения интенсивностей изнашивания образцов. Образцы из разработанных ЛМКМ превосходили по износостойкости стандартные литые бронзы не менее чем в 5–6 раз для низколегированных матриц и не менее чем в 10–20 раз для высоко- и сложнолегированных матриц. Интересно отметить, что при нагрузке 0,8 МПа интенсивность изнашивания ЛМКМ для всех трех групп выравнивалась и оказалась меньше в 8–10 раз показателей для закаленной стали.

Исследования триботехнического поведения ЛМКМ в условиях граничного трения проводились при тех же нагрузках, что и при сухом трении ($P = 8$ МПа). При использовании пластичной смазки солидола УС-2 коэффициент трения покоя ($f_{тр.п}$) составлял 0,09, а коэффициент трения движения ($f_{тр.дв}$) – 0,061. В процессе испытаний было установлено, что через 1500 циклов наступает режим трения без смазки, приводящий к появлению задира. В то же время исследования показали, что введение в смазку высокодисперсных кластеров синтетического углерода, снижает интенсивность изнашивания поверхностей трения. При триботехнических испытаниях с использованием жидкой смазки было применено маловязкое турбинное масло Тп-22 и моторное масло МС-20С. При температуре испытаний 20 °С система характеризовалась коэффициентом трения покоя $f_{тр.п} = 0,093$ и коэффициентом трения движения $f_{тр.дв} = 0,077$. Добавка УДАГ-СП к турбинному маслу привела к резкому снижению силы трения, что проявилось в двукратном уменьшении коэффициента трения покоя и десятикратном снижении коэффициента трения движения ($f_{тр.п} = 0,05$, $f_{тр.дв} = 0,0063$). Вероятно, применение в качестве добавок высокодисперсных кластеров синтетического углерода, в частности ультрадисперсных алмазов (УДА), улучшает прирабатываемость поверхностей трения и повышает износостойкость рабочих поверхностей деталей в триботехническом сопряжении.

При исследовании влияния температурного режима на триботехнические свойства ЛМКМ с применением масла МС-20С установлено, что при температуре 20 °С коэффициенты трения покоя и движения составляют соответственно $f_{тр.п} = 0,031$ и $f_{тр.дв} = 0,0085$. При повышении температуры они начинают увеличиваться, особенно резкое их возрастание наблюдается в области температур 45–50 °С. Затем коэффициент трения несколько стабилизируется (при температуре 60 °С $f_{тр.п} = 0,128$, $f_{тр.дв} = 0,039$), а при температуре 70 °С из-за существенного уменьшения вязкости масла наблюдается задиры. Добавка шихты УДАГ к маслу МС-20С не приводит к значительному снижению коэффициента трения при 20 °С, так как масло обеспечивает высокую несущую способность при этой температуре. В то же время с повышением до температуры 60 °С для модифицированного УДАГ масла происходит последовательное снижение коэффициентов трения до $f_{тр.п} = 0,06$, $f_{тр.дв} = 0,007$. Задиры появляются только при разогреве смазки свыше 90 °С.

Проведенные исследования показали перспективность применения в трибосопряжениях новых композиционных материалов с макрогетерогенной структурой и модифицированных УДАГ смазочных материалов.

УДК 541.64.539.23

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

В. П. КАЗАЧЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта

Методы вакуумного осаждения полимерных слоев наиболее полно отвечают современным требованиям технологической и экологической чистоты производства материалов для высоких технологий, энерго- и ресурсосбережения, могут быть интегрированы в технологические процессы ма-

шиностроения, приборостроения, микроэлектроники, легкой промышленности. Основными методами формирования тонких покрытий в вакууме являются плазмохимическая полимеризация, полимеризация мономера на поверхности твердого тела под действием концентрированного потока энергии (КПЭ), нанесение покрытий из активной газовой фазы, формируемой диспергированием исходного полимера КПЭ, а также комбинированные способы, активно развивающиеся в последние годы.

Перспективными способами формирования вакуумных покрытий являются методы диспергирования полимеров КПЭ в виде лазерного излучения, ионного или электронного луча. В работе анализируются особенности методов лазерного нанесения с использованием излучения длиной волны 1,06 и 10,6 мкм, эксимерных с длиной волны 248 нм и импульсных твердотельных лазеров с длиной волны 532 нм. При достаточной плотности энергии практически все полимеры в вакууме диспергируются с выделением летучих продуктов. Для данного метода характерно такое положительное свойство, как отсутствие влияния на работу источника КПЭ давления паров в реакционной камере. Разновидностью лазерного импульсного метода нанесения органических и полимерных покрытий является метод (MAPLE- matrix assisted pulsed laser evaporation) импульсного лазерного испарения при помощи матрицы, появившийся в 1996 году. Сущность метода заключается в том, что импульсное лазерное излучение направляют на мишень раствора полимера или органического материала, находящуюся при температуре 100...200 К. Лазерное излучение испаряет поверхностный слой мишени, летучий растворитель откачивается вакуумным насосом, а из органических молекул образуется покрытие. Растворитель и концентрация раствора подобраны так, чтобы при воздействии лазерного излучения на замороженную мишень энергия поглощалась в основном растворителем и он испарялся. Органические молекулы при этом переходят в газовую фазу и переносятся на подложку, не подвергаясь деструкции. Таким методом получены покрытия из полисилоксанов и углеводов.

Получение полимерных покрытий возможно при ионном диспергировании органической мишени, которое предполагает воздействие потока ионов, как правило, инертного газа на полимерную мишень. Ионный поток формируется либо в специальном источнике, либо в ВЧ плазме или магнетроне. При ионно-плазменном, ионно-лучевом диспергировании полимеров в большинстве случаев получают покрытия из фторсодержащих полимеров. В работе анализируются исследования по формированию покрытий полиэтилена, полиуретана методом ионного асистирувания.

При электронно-лучевом воздействии на полимер, как и при лазерном воздействии, в качестве исходного материала может быть использован широкий круг полимеров. Воздействие электронов с энергией 500–2000 эВ на полимеры при получении покрытий методом электронно-лучевого диспергирования (ЭЛД) приводит к появлению процессов, общих для всех материалов. Совершенствование вакуумного оборудования, источников электронного пучка, систем поддержания устойчивой работы электронных пушек при низком давлении позволяет широко использовать электронно-лучевое диспергирование при формировании многослойных, композиционных полимерных, в частности, металлополимерных вакуумных покрытий.

Основные особенности метода ЭЛД можно сформулировать следующим образом: поверхностное воздействие КПЭ; совместное радиационное и термическое действие КПЭ на исходный материал; активация продуктов диспергирования в процессе их генерации и адсорбции на поверхности; возможность использования широкого спектра материалов для нанесения покрытий, формирования композиционных и многослойных систем; легкость регулирования параметров КПЭ в широком диапазоне значений и, следовательно, возможность автоматизации технологического процесса; простота, надежность, низкая стоимость оборудования для диспергирования. Как правило, источник КПЭ располагается непосредственно в рабочей камере, вследствие этого имеются ограничения на верхний предел рабочих давлений, а также необходимо учитывать зарядку поверхности диэлектрических мишеней.

В последнее время активно развиваются комбинированные методы, сочетающие в себе элементы трех основных направлений. Так, диспергирование органических материалов и получение летучих продуктов производятся термическим, лазерным или электронно-лучевым методами, а для их дополнительной активации применяется газовый разряд. Растущее на подложке покрытие или летучие продукты диспергирования могут обрабатываться потоком электронов, подвергаться нагреву.

Сочетание метода термического диспергирования исходного органического вещества из открытого источника или ячейки Кнудсена с ионизацией летучих продуктов и ионной обработкой растущего покрытия имеет место в методе IAD (IAD – ionization-assisted deposition). Таким образом получают полимерные пленки и пленки из низкомолекулярных органических веществ. Методом IAD были сформированы покрытия из ПЭ и ПТФЭ, а также производился синтез полимерных покрытий совместным нанесением двух бифункциональных мономеров, например, синтез полиамида из диамина и дихлорида, полиуретана из диамина и диизоцианата. При этом потоки мономеров формируются в двух отдельных испарителях и направляются на подложку.

Модификациями метода термического диспергирования являются метод активации летучих продуктов электронным ударом, в частности, продуктов термического диспергирования политетрафторэтилена, а также метод нанесения тонких полимерных пленок с использованием плазмы газового разряда низкого давления, где в качестве газопаровой смеси использовались продукты термодеструкции полипропилена (ПП). Пленки, получаемые при конденсации активированных плазмой микрокапельных потоков продуктов термической деструкции ПП, являются аморфными, обладают хорошей адгезионной прочностью к подложке, высокой однородностью, не имеют сквозных пор, обладают достаточно высокой термической стабильностью (более 850 °C), модулем Юнга, достигающим значения 20 ГПа. Такие покрытия представляют собой композицию из полимерной матрицы с включениями более плотной, возможно алмазоподобной, углеродной фазы.

Таким образом, наиболее перспективными методами формирования тонких органических покрытий в вакууме являются методы осаждения из активной газовой фазы, генерируемой воздействием КПЭ на исходный материал. Такие методы позволяют формировать композиционные и многослойные покрытия из полимеров, органических материалов, наночастиц, т. е. материалов с существенно различными физико-химическими характеристиками, получать тонкие покрытия из полимеров, из которых нанести покрытия другими методами затруднительно или невозможно, особенно на поверхность материалов, чувствительных к действию температуры, растворителей, агрессивных сред.

621.878.6

СИСТЕМА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОЛКАЮЩЕГО УСИЛИЯ НА СКРЕПЕР СО СТОРОНЫ ТОЛКАЧА

О. В. ЛЕОНЕНКО

Могилевский государственный технический университет

Металлоконструкция скрепера является несущей системой для всех агрегатов и воспринимает все внешние нагрузки, поэтому от её прочности и надёжности зависит работоспособность всего скрепера в целом. В последнее время для работы со скрепером используется большой спектр толкачей с тяговым усилием от 100 до 350 кН, вследствие этого возрастает как статическая, так и динамическая нагруженность металлоконструкции скрепера. Применение мощных толкачей сокращает время наполнения ковша скрепера, но увеличивает нагруженность металлоконструкции. С целью снижения статической и динамической нагруженности на металлоконструкцию скрепера было разработано устройство по ограничению толкающего усилия на скрепер со стороны толкача.

Для этого на задней раме скрепера установлено демпфирующее устройство, состоящее из подвижного бампера, соединенного с рамой посредством гидроцилиндров и гидропневмоаккумулятора. В гидросистеме ограничения толкающего усилия установлены два реле давления, имеющих расчетную зону нечувствительности, которая обеспечивает при верхнем предельном значении толкающего усилия, а значит, и давления в гидросистеме, выглубление рабочего органа, а при нижнем – заглубление. Реле давления может регулироваться в зависимости от величины силы тяги конкретного толкача и условий его сцепления с опорной поверхностью. Таким образом система ограничивает толкающее усилие со стороны толкача и тем самым ограничивает напряженно деформируемое состояние металлоконструкции скрепера.

Телескопическая часть демпфирующего устройства выполнена в виде профилей, помещённых один в другой с возможностью перемещения, что обеспечивает восприятие боковых нагрузок со