

где б, в, г, ... – параметры, величина которых случайна и может быть установлена только с некоторой вероятностью  $P$  или, вообще, задана в некотором интервале  $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ .

В общем виде норма расхода топлива для локомотивов,  $\text{кг} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$  брутто, определяется по формуле

$$n = n_{\Pi} + \Delta n_{\tau} + \Delta n_{\chi} + \Delta n_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где  $n_{\Pi}$  – соответственно удельный расход топлива на перемещение поезда;  $\Delta n_{\tau}$  – расход, отнесенный к измерителю на восстановление скорости движения, потерянной при остановках поезда;  $\Delta n_{\chi}$  – удельный расход топлива на холостой ход;  $\Delta n_{\text{ст}}$  – удельный расход топлива, связанный со стоянками.

Рассмотрим более подробно расход топлива на перемещение поезда. Он определяется размерами механической работы, кН, совершаемой локомотивом:

$$A = 1000(P + Q)(w_0 + i_3)L, \quad (4)$$

где  $P$  – масса локомотива, т;  $Q$  – масса состава, т;  $w_0$  – основное удельное сопротивление поезда, Н/кН,

$$w_0 = \frac{Pw_0' + Qw_0''}{P + Q}; \quad (5)$$

$w_0'$ ,  $w_0''$  – основное удельное сопротивление локомотива и вагонов, Н/кН;  $i_3$  – средний эквивалентный уклон участка, ‰;  $L$  – протяженность участка нормирования.

Норма расхода топлива,  $\text{кг} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$  брутто, затрачиваемого на передвижение поезда,

$$n = \frac{3,35}{\eta} \cdot \frac{P + Q}{Q} (w_0 + i_3). \quad (6)$$

Из приведенной формулы видно, что норма расхода топлива, затрачиваемого на перемещение поезда, находится в зависимости от множества параметров, а особенно от основного удельного сопротивления поезда, эквивалентного уклона и массы состава.

Определим норму расхода топлива, затрачиваемого на передвижение поезда для средних условий ( $Q = 3500$  т, для локомотива 2ТЭ10  $P = 255$  т,  $\eta = 1$ ,  $i_3 = -1$  ‰,  $q = 14$  т/ось,  $v = 60$  км/ч):

$$n = \frac{3,35}{1} \cdot \frac{255 + 3500}{3500} (2,75 - 1) = 6,3 \text{ кг} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км брутто}.$$

Однако современные исследования в этой области привели к тому, что методика расчета основного удельного сопротивления поезда, которая входит в теорию тяговых расчетов ПТР, не учитывает того факта, что в реальных условиях эксплуатации не всегда удается точно измерить физические параметры модели. Нельзя сказать также, что параметры модели свои значения сохраняют неизменными.

УДК 621.9:539.211

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА

*О. С. КИСЕЛЕВСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта*

Разработка новых классов нанокпозиционных материалов, обладающих свойством самоадаптации к изменениям условий трения связана с исследованием неравновесных механизмов изнашивания, а также с изучением морфологии контактирующих поверхностей. Специфика фрикционного контакта такова, что традиционно используемые для описания элементов структуры идеализированные термины евклидовой геометрии не в состоянии описать сложность и многофакторность её строения. Базой для количественного описания строения диссипативных структур явилась теория фракталов, в частности, её приложение к физике твёрдого тела, сформулированное в 1977 г. Б. Мандельбротом [1]. Фрактальный подход к параметризации морфологии физических объектов привёл к углублению теоретических представлений о физических и механических свой-

ствах неупорядоченных систем. Применение к описанию диссипативных структур теории фракталов позволяет не только количественно охарактеризовать их строение, но и понять внутренний механизм, лежащий в основе их формирования.

В рамках данной работы исследованы морфология и трибомеханические свойства поверхностей антифрикционных покрытий, таких как безводородные алмазоподобные покрытия, нанесенные из плазмы импульсного катодно-дугового разряда (АПП), композиционные электролитические покрытия на основе никеля с инкорпорированными в матрицу нанодисперсными частицами триоксида фольфрама и молибдена (КЭП), а также тройные электролитические покрытия системы свинец-олово-сурьма (Pb-Sn-Sb). Предложена численная модель статического контакта поверхностей с фрактальной морфологией, позволяющая с учетом механических свойств материалов рассчитывать давление и фактическую площадь контакта, прогнозировать режимы деформации и адаптации фрактальной поверхности к условиям нагружения.

Теоретическая часть исследований была посвящена анализу известных методов фрактального анализа реальных физических объектов и способов интерпретации результатов, а также их программной реализации. Из известных методов расчёта фрактальной размерности поверхностей для анализа изображений атомно-силовой (АСМ), оптической и электронной микроскопии, а также профилограмм могут быть применены методы подсчёта фактической площади, островов среза (площадь-периметр) и Фурье анализа профилограмм [2]. Алгоритмы этих методик были реализованы программно и протестированы на объектах с известной фрактальной размерностью. На стадии отладки и тестирования было установлено, что наиболее точным, но вместе с тем чрезвычайно громоздким, является алгоритм подсчёта фактической площади. Метод островов среза может быть применён только к анализу изображений АСМ, где яркость точек изображения пропорциональна координате  $z$  соответствующей точки поверхности. Для фрактального анализа профилограмм может быть применён метод Фурье анализа профилей. Однако, как показали эксперименты, результаты этого метода значительно отличаются от результатов метода подсчёта фактической площади. При скрупулёзном изучении истории развития данного метода было выяснено, что лежащая в его основе эмпирическая зависимость фрактальной размерности  $D$  от тангенса угла наклона  $\lambda$  Фурье спектра мощности шероховатости профиля

$$D_S = \frac{5 - \lambda}{2}$$

была построена в 1979 г. Б. Мандельбротом по пяти экспериментальным точкам и в дальнейшем не уточнялась [3]. На основании анализа более чем ста моделей поверхностей с известной размерностью нами была предложена эмпирическая зависимость

$$D_S = 2e^{\frac{-2\lambda}{3}} + 2,$$

являющаяся, на наш взгляд, более точной [4].

Экспериментальная часть работы, включающая в себя триботехнические и механические испытания антифрикционных покрытий, а также анализ их морфологии позволили получить важные результаты о взаимозависимости фрактальных свойств поверхности с триботехническими свойствами и стадиями процессов приработки. Установлено, что топологическая структура поверхности АПП, полученных из плазмы импульсного катодно-дугового разряда, в масштабном диапазоне от 50 нм до 100 мкм обладает фрактальными свойствами с размерностью  $D = 2,48 \pm 0,01$  [4]. Между коэффициентом трения АПП по АПП и фрактальной размерностью поверхности существует линейная корреляция. При этом коэффициент трения в процессе испытаний снижается от  $f = 0,3$  до  $0,18$ , а фрактальная размерность возрастает и на стадии установившегося режима трения имеет значение  $2,59$ . Изменение фрактальных и механических характеристик КЭП при инкорпорировании ультрадисперсных частиц  $WO_3 \cdot MoO_3$  определяет триботехнические свойства композита. Так, в паре трения сталь – КЭП, в условиях граничной смазки, при достижении величины среднего давления на номинальной площади контакта менее 1 МПа, имеет место снижение интенсивности изнашивания покрытия от  $I_L = 2 \cdot 10^{-7}$  до  $2 \cdot 10^{-9}$ . Процесс приработки сопровождается увеличением фрактальной размерности от  $D = 1,68 \pm 0,02$  до  $1,89 \pm 0,09$  и установлением значения коэффициента трения  $f = 0,28 \pm 0,01$ . Для этих покрытий показано преобладание абразивного механизма изнашивания, в то время как для пары трения сталь – никель основным механизмом изнашивания является адгезионный [5].

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований была предложена модель статического контакта фрактальных поверхностей, которая учитывает параметры топографии (фрактальную размерность, шероховатость) и механические свойства (модуль упругости, коэффициент Пуассона, микротвёрдость) контактирующих фрактальных поверхностей. Модель основана на представлении профиля поверхности в виде функции Вейерштрасса-Мандельброта, аппроксимации контактирующих неровностей кру-

говыми сегментами и квадратичной зависимости общей площади сечения поверхности от общей длины сечения её профиля на каждом уровне. Моделирование дискретного контакта фрактальных поверхностей позволило получить зависимости фактической площади контакта и локальных давлений от внешней нагрузки, механических свойств поверхностных слоёв и параметров топографии для фрактальных поверхностей алмазоподобных покрытий [6].

Разработанный комплексный подход к исследованию трибологических свойств поверхностей трения и их морфологии в рамках параметрического и фрактального подходов дает возможность оптимизировать триботехнические и эксплуатационные свойства узла трения подпятник – планшайба аксиально-поршневого насоса А1-56/25.03.

УДК 621.333.41:621.314.572

## ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ САЛЬДИРОВАННОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*О. О. КОМЯКОВА, Т. В. КОМЯКОВА*

*Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация*

В соответствии с «Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года» одной из важных задач является внедрение энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий.

Электрифицированная железная дорога – это специфический потребитель электрической энергии. В общем случае тяговые подстанции получают питание от различных узлов одной или нескольких энергосистем, что вызывает транзит мощности по системе тягового электроснабжения и возврат электрической энергии из тяговой в питающую сеть. Возврат электрической энергии в сети энергосистем осуществляется при рекуперативном торможении электроподвижного состава как на дорогах постоянного, так и переменного тока. Для этого необходимо наличие инверторов на электровозах переменного тока или на тяговых подстанциях дорог постоянного тока. Экономическая эффективность применения инверторов определяется стоимостью возвращенной электроэнергии, уменьшением износа тормозных колодок, увеличением скорости движения поездов на спусках. Однако энергия, возвращаемая в сети внешнего электроснабжения, при расчетах за потребленную электроэнергию на части дорог не учитывается, и, следовательно, железные дороги несут значительные убытки.

Одним из способов решения указанной проблемы может быть внедрение сальдированного учета электроэнергии по сети электрифицированных железных дорог, под которым понимается определение расхода электроэнергии на тягу поездов как разности количества электроэнергии, принятой из сетей питающей энергосистемы и возвращенной в них. Основной причиной, по которой в настоящее время отсутствует возможность внедрения сальдированного учета за электрическую энергию, является отказ питающих энергосистем. Это, в свою очередь, объясняется следующими причинами:

- 1) отсутствием руководящих указаний Минпромэнерго к применению сальдированного учета электрической энергии из контактной сети в сети питающих энергосистем при расчетах за электроэнергию, потребленную на тягу поездов;
- 2) установкой приборов коммерческого учета возврата электроэнергии не на границе балансовой принадлежности. Ряд энергоснабжающих организаций указывают данную причину со ссылкой на главу 1.5 «Правил устройства электроустановок». Тем не менее, расчет за потребленную электрическую энергию на тягу поездов осуществляется по приборам коммерческого учета, установленным не на границе балансовой принадлежности. Таким образом, отказ от сальдированного учета электрической энергии по данной причине является необоснованным;
- 3) низкой загрузкой трансформаторов тока при возврате электрической энергии, которая должна быть не менее 5 % (пункт 1.5.17 «Правил устройства электроустановок»);
- 4) несоответствием качества возвращаемой электрической энергии требованиям ГОСТ 13109-97. Качество возвращаемой электрической энергии оценивается по коэффициенту искажения синусоидальности кривой питающего напряжения. Однако этот коэффициент определяется не относительным содержанием высших гармонических составляющих в токе возвращаемой энергии в сеть или степенью искажения синусоидальности тока, на которые ссылаются, как на основную причину снижения качества электроэнергии, а абсолютным значением гармонических составляющих этого тока.