

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗОВОГО МИКРОСКОПА-ПРОФИЛОМЕТРА

Смирнов Е.Н., Колонов С.А., Пильгун Ю.В., Стельмах А.У.<sup>1</sup>, Куцев А.В.<sup>1</sup>  
 Киевский национальный университет им. Т. Шевченко,  
 Национальный авиационный университет<sup>1</sup>

Эффективность современных машин во многом зависит от качества обработки рабочих поверхностей комплектующих деталей. К таким рабочим поверхностям деталей машин относятся поверхности, которые при эксплуатации определяют эксплуатационное качество машин и механизмов и характеризуются большим спектром показателей в зависимости от условий их эксплуатации:

- поверхности трибосистем качения, скольжения или вращения, контактные поверхности металлообработки и т.п., которые определяют ресурс узлов трения, их надёжность и другие характеристики: износостойкость, сила трения, общий уровень вибраций, шум, коэффициент детонации, стойкость инструмента и качество обработки деталей машин и т.д. (особенно при высоких скоростях и удельных давлениях на контактах);

- поверхности деталей гидро- и (или) газодинамических систем, которые образуют с рабочим телом (рабочая жидкость, перегретый пар, воздух и др.) гидро- и (или) газодинамическую контактную пару, при эксплуатации которой процессы, протекающие в пограничных слоях, определяют потери и эффективность гидравлического агрегата, системы, или гидравлической пары, например внутренние поверхности продуктопроводов, гидросистем, поверхности гребных винтов, поверхности обшивок водоплавающих объектов, лопаток гидравлических турбин и т.п.; или поверхности деталей газодинамических систем, например, лопаток компрессоров или турбин, поверхности других деталей, образующих газоздушный тракт газотурбинных двигателей, то же в турбоэлектродвигателях, обшивка самолёта, ракеты, снаряда или другого летающего объекта и т.д., особенно при высоких скоростях истечения рабочего тела;

- поверхности деталей радиоэлектронных приборов и других электрических машин (антенны, провода и т.п.), где качество поверхностей определяет их функциональную эффективность за счёт радиоэлектронных и магнитных процессов, протекающих в приповерхностных слоях (особенно на высоких частотах радиоэлектронных и (или) электрических сигналов).

Критериями качества поверхностей деталей машин являются параметры шероховатости. В современном машиностроении наиболее широко используются контактные методы сканирования поверхностей механическим щупом. Получаемый таким образом профиль на профилографах или уровень осцилляций щупа в определённом направлении анализируется и определяются его характеристики в удобном виде системы параметров  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,

$S_m$  или др. Эти параметры стандартизованы соответствующими ГОСТами и регламентируются конструкторской и технологической документацией производства. Традиционно в мировой практике машиностроения используются различные контактные профилографы-профилометры, работающие на принципе ошупывания поверхности индентором весьма внушительных размеров (радиус скругления щупа от 4 мкм). При контактном измерении, кроме того, что поверхность повреждается, получаемая при этом информация - весьма скудная: оценивается качество поверхности лишь по вертикальному отклонению щупа, скользящего по вершинам лишь одного сечения профиля, не проникая во все впадины; на большинстве приборов щуп осциллирует относительно также осциллирующей базовой поверхности, что не позволяет корректно описать даже один профиль, не говоря о принципиальной невозможности объёмно описать конфигурацию поверхности.

В качестве одного из возможных вариантов решения данной проблемы предлагается использование ЛСДФМП (рис.1).

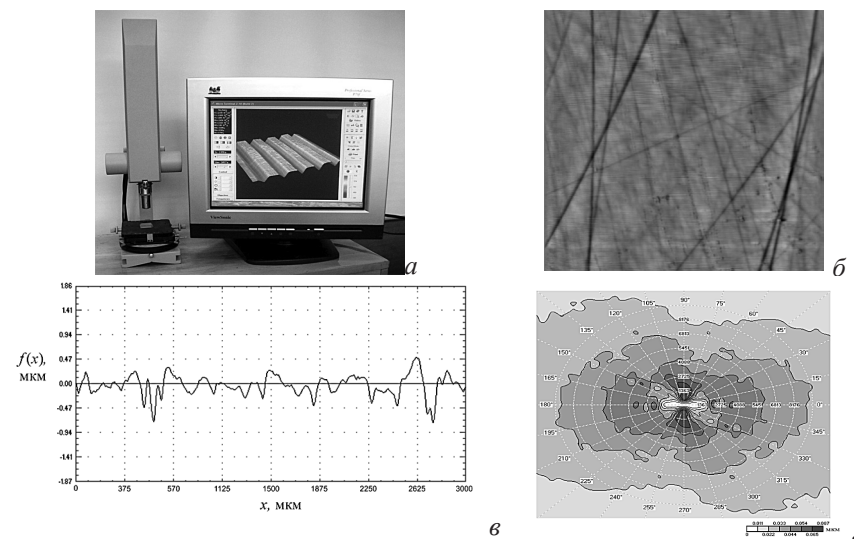


Рис. 1. Исследование шероховатости тестовой поверхности с параметром шероховатости  $R_a$  0,15 мкм: а - внешний вид микроскопа-профилометра ЛСДФМП, б - двумерное изображение рельефа тестовой поверхности, восстановленного из данных, полученных двумерным дифференциально-фазовым методом; в - профиль тестовой поверхности; г - двумерное распределение дисперсии тестовой поверхности по направлению для отдельных спектральных составляющих пространственного спектра поверхности (по радиусу - пространственные частоты в см<sup>-1</sup>)

В этом приборе предполагается реализация дифференциально-фазового метода исследований, обеспечивающего высокую чувствительность к изменению профиля поверхности по высоте (до 1 ангстрема) и хорошую виброзащищенность, в сочетании с использованием быстродействующих двухкоординатных акустооптических устройств управления лазерным излучением. Это всё в совокупности должно давать возможность получать двумерную дифференциально-фазовую информацию о поверхности объекта исследования путем его растрового сканирования. Это должно позволять не только проводить исследования параметров данной поверхности в любом направлении с минимальными затратами времени и высокой точностью, но и вводить новые двумерные параметры для описания свойств поверхности, которые до сих пор не рассматривались в связи с трудоемкостью их получения. Так, например, существующие методы определения параметров шероховатости поверхности являются либо одномерными, т. е. измеряющими шероховатость вдоль одного профиля поверхности или направления (механический метод, методы светового и теневого сечения, растровый метод), либо по площади освещаемой поверхности светового пятна (рефлектометрический метод). Эти методы предполагают, что исследуемая поверхность является случайной и однородной. Но на самом деле реальные поверхности характеризуются особенностями поведения шероховатости, в частности, по направлению, так как характер шероховатости поверхности в значительной степени зависит от способа ее обработки.

Триботехнические исследования, проведенные в научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий НИЧ НАУ показали, что угловая пространственная зависимость параметров шероховатости является весьма важным фактором при трении. Например, износостойкость, сила трения, контактная температура трибосистемы сильно зависят от пространственного амплитудно-частотного распределения микрогеометрии рабочих поверхностей относительно направления их эксплуатации. В этой связи микроскоп-профилометр дает возможность легко получить представление о периоде или пространственной частоте шероховатости в заданном направлении (рис.2). Кроме того, собственные предварительные результаты исследования показали большие перспективы использования ЛСДФМП для измерений локальных дефектов поверхностей, в том числе и оценки объемного износа деталей машин, что весьма актуально, в частности, при лабораторных триботехнических испытаниях.

Экспериментально установлено, что именно объемная пространственная шероховатость поверхностей трения несёт информацию об её триботехнических свойствах. При исследовании влияния шероховатости на эффективность веществ-организаторов безадгезионного трения экспериментально было установлено, что один из наиболее распространенных параметров

шероховатости  $Ra$  не несет информацию о свойствах поверхности при трении. То есть, один из наиболее распространённых стандартизованных параметров шероховатости  $Ra$ , которые определяются по одному и/или по нескольким профилям, характеризуют лишь среднее отклонение выступов и впадин относительно средней линии и не несут информацию о геометрии вершин выступов. А ведь именно поверхность вершин выступов вступает в контактные взаимодействия с поверхностью другого тела посредством граничных слоев при трении. Нами была проведена серия следующих экспериментов: образующая цилиндров контрообразцов после шлифования на круглошлифовальном станке подвергалась полировке последовательно различными алмазными пастами зернистостью 40, 20, 10, 5, 3 и 1. Параметр  $Ra$  таких поверхностей после измерений на профилометре «Калибр 283» был менее 0,02 мкм. Одни контрообразцы после этого подвергались шлифованию на круглошлифовальном станке, после чего параметр  $Ra$  находился в пределах 0,47...0,53 мкм, т.е. приблизительно 0,5 мкм.

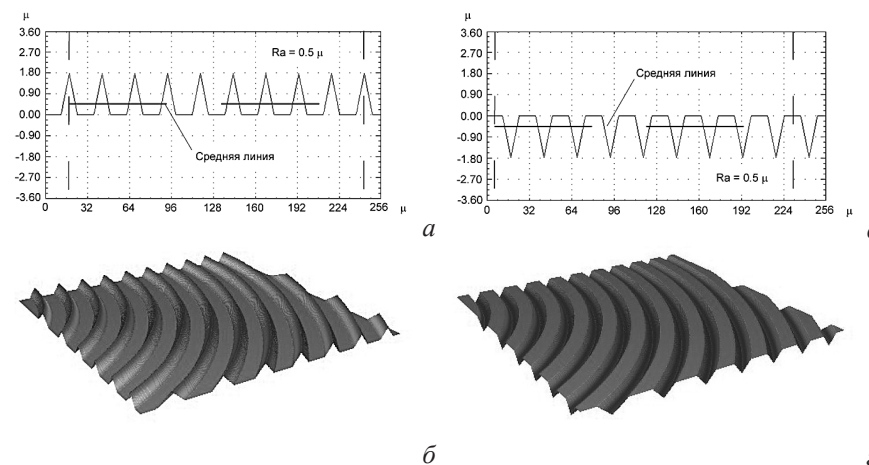


Рис.2. Модельная поверхность, имеющая геометрию в форме выступов (профиль а) и её 3D вид (б), а также в форме впадин (в) и её 3D вид (г) с одинаковым параметром шероховатости  $Ra$  0,5 мкм

Другие полированные контрообразцы подвергались шлифованию путём их вращения и прижатия к поверхности образующей цилиндра обычной наждачной бумаги с зернистостью, соответствующей №№ 2, 5, 7, 10 последовательно, до тех пор, пока величина  $Ra$  не достигла 0,5 мкм. Такое значение параметра  $Ra$  было достигнуто при шлифовании наждачной бумагой №10. После этого контрообразцы с одинаковым значением величины  $Ra$ , рав-

ным 0,5 мкм, но поверхности которых получены различными технологическими приемами, подвергались трению по неподвижному плоскому образцу с одинаковой шероховатостью (менее 0,02 мкм). Испытания проводились в среде диалкилбензолового масла. Трение контртела, обработанного на круглошлифовальном станке, характеризовалось начальным износом 5 мкм и интенсивностью изнашивания 7 мкм в час. При этом величина коэффициента трения находилась в пределах 0,15...0,2, температура трения достигала 98 °С. При трении контробразцов, полученных другой технологией, (с таким же параметром  $Ra$ ) начальный износ достигал 1 мкм, интенсивность изнашивания 0,3 мкм в час, коэффициент трения не превышал 0,1, а температура не превышала 75 °С.

Такое разительное отличие триботехнических свойств поверхностей с одинаковым параметром шероховатости  $Ra$ , измеряемым на стандартном профилометре, связана с тем, что процедура шлифования алмазным кругом на круглошлифованном станке при встречном вращении контробразцов и круга приводит к формированию на поверхности выступов. А при шлифовании вращающихся контробразцов путем прижатия неподвижного шлифовального материала приводит к образованию впадин. Следовательно, в первом случае вершины выступов имели геометрию, близкую к геометрии режущей кромки резца (рис. 2, а, б), а во втором случае вершины выступов имели геометрию плоских платформ и шероховатость в этом случае по Ахматову А.С. названа каньенообразной (рис. 2, в, г).

Исследование шероховатости поверхностей, полученных различными технологическими путями, контактными профилографами-профилометрами типа «Калибр» не показали каких-либо принципиальных различий ни по профилограммам, ни путем профилометрирования. То есть лишь использование бесконтактного лазерного сканирующего дифференциально-фазового акустооптического профилографа-профилометра ЛСДФМП позволило установить принципиальную разницу состояния поверхностей, полученных различными технологическими приемами. На рис. 2, б и рис. 2, г) (под профилограммами) показаны трехмерные изображения поверхностей контробразцов, полученных на ЛСДФМП, которые свидетельствуют о том, что параметр шероховатости  $Ra$  не отражает фактического состояния поверхности принципиально, т.е. является несостоятельным. Кроме этого, качественно новая информация о пространственном состоянии поверхностей деталей машин, получаемая на микроскопе-профилометре ЛСДФМП позволит разрабатывать новые технологические приемы доводки рабочих поверхностей с наиболее эффективной эксплуатационной микрогеометрией. Это крайне необходимо для машиностроения при изготовлении трущихся деталей машин, лопаток турбин и компрессоров, деталей прецизионной техники и т.д.

Внедрение ЛСДФМП в испытательно-измерительный трибологический

комплекс «NAU Friction Wear Test System» позволило существенно уменьшить погрешность получаемых трибологических характеристик конструкционных и смазочных материалов, а именно показателей их противоизносных и антифрикционных свойств, с 30 до 9 %. Таким образом, путем использования ЛСДФМП с высокой чувствительностью по профилю (1 нм) в трибологических испытаниях, существенно повышается воспроизводимость получаемых результатов, как на стадии контроля 3D топографии исходных трущихся поверхностей, так и при измерении величины износа.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЫ И СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ

*Аксенов А.Ф., Стельмах А.У., Шевченко Р.А., Радзиевский В.А.*

*Национальный авиационный университет*

Зависимость сил трения от скорости скольжения является одной из главных характеристик трибоконтакта. В трибологии ее принято называть «характеристикой трения» и рекомендуется учитывать при конструировании трибосистем. Экспериментальные данные, полученные в различных лабораториях, свидетельствуют о вариациях силы трения при увеличении скорости скольжения в зависимости от условий. В одних случаях она практически не изменяется, в других – возрастает, в третьих – уменьшается, а в условиях жидкостного трения при обильном смазывании контакта с увеличением скорости скольжения, как правило, наблюдается увеличение коэффициента трения до некоторого максимального значения, после которого сила трения уменьшается. При достижении критической скорости сила трения начинает возрастать, вплоть до схватывания.

Влияние скорости скольжения  $v$  на изменение силы трения видно из диаграммы Герси-Штрибека (рис.1), представляемой в виде зависимости коэффициента трения  $\mu$  от характеристики подшипника, то есть от безразмерной величины  $\lambda = \eta v/p$ , где  $\eta$  - вязкость,  $p$  – осевая нагрузка. Эта характеристика по своей сути отражает толщину смазочного слоя. При значении  $\lambda = \lambda^*$ , соответствующем минимуму коэффициента трения  $\mu$ , происходит переход от граничного трения к жидкостному. Кривая интенсивности изнашивания  $I$  показывает, что при  $\lambda > \lambda^*$  контакт деталей размыкается, и износ теоретически исчезает.