



УДК 624.011.78:629.7.018.4

© Г. В. Моторин, С. В. Гончаров, А. Т. Тарасенко, В. А. Иванов, 2009

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФТОРОПЛАСТА Ф4 ПРИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Моторин Г. В. – инженер Хабаровской энерготехнологической компании, асп., тел.: (4212) 21-58-71, e-mail: svd@energo.khv.ru; *Гончаров С. В.* – инженер кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», асп., тел.: (4212) 37-51-90, e-mail: Ya-84@list.ru; *Тарасенко А. Т.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90; *Иванов В. А.* – д-р. техн. наук, проф. завкафедрой «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90, e-mail: molk@mail.khb.ru (ТОГУ)

При развитии новых полимерных конструкционных материалов и использовании их в узлах трения возникает проблема диагностирования и определения критических параметров разрушения для изделий из этих материалов. Физическим носителем информации о состоянии элементов работающего оборудования является виброакустический сигнал – собирательное понятие, включающее информацию о колебательных процессах (вибрационных, гидро- или газодинамических и пр.) в самом механизме и в окружающей среде.

In devising novel polymeric constructional materials and using them in frictional units a problem emerges of diagnosing and pinpointing critical parameters of destruction for items from those materials. Vibroacoustic signal is an indicator of the state of the operating device components, which has record about vibrational processes (oscillating, hydro- and gas dynamic, etc.) in the machine itself and the ambient medium.

Ключевые слова: виброакустические характеристики, фторопласт-4, трение.

Специфика виброакустической диагностики зарождающихся дефектов состоит в том, что составляющие колебательного процесса узла машинного оборудования в начальной стадии деградации, содержащие информацию о возникновении повреждения, обладают слишком слабой энергетикой по сравнению с колебательной энергией нормально функционирующей машины. Большой уровень помех и сравнительно малые изменения полезного сигнала определяют сложность и специфику диагностирования [1]. В исключительных случаях, когда датчик непосредственно контактирует с диагностируемой деталью, увеличение общего уровня виброакустического сигнала свидетель-

ствуется о появлении дефекта. Однако, как правило, существенное увеличение общего уровня сигнала или отдельных спектральных компонентов говорит лишь о грубых изменениях состояниях диагностируемого механизма, приводящих к потере его работоспособности. Локализация же зарождающегося дефекта, определение степени развития развивающейся неисправности и прогноз на будущее возможны лишь на основе анализа изменения тонкой структуры виброакустического сигнала и связи их с кинематикой и динамикой механизма. Появление неисправностей в узлах роторных механизмов и машин циклического действия провоцирует изменение структуры виброакустических процессов, сопровождающих функционирование машинного оборудования, изменение соотношения между его компонентами, появление новых компонентов [2].

Характер изменения вибрационных процессов, вызванных изменением состояния контактирующих поверхностей, имеет ряд общих черт, несмотря на различие конструкций и назначение кинематических узлов. Это позволяет сформулировать некоторые правила диагностирования дефектов контактирующих поверхностей типа абразивного износа, выкрашивания и задира [3].

Истирание (абразивное изнашивание) контактирующих поверхностей сопровождается изменением микронеровностей в зоне контакта, нарушением микро- и макрогеометрии деталей, следствием чего является рост шумового компонента, увеличение амплитуд гармонического ряда основной частоты возбуждения кинематического узла и перераспределением амплитуд между гармониками этого ряда.

Выкрашивание (локальное изнашивание) контактирующих поверхностей проявляется в развитии раковин в зоне контакта, вызывает появление периодических всплесков вибросигнала, модулирующих основной колебательный процесс. Периодическое попадание раковин в зону контакта при вращательном или циклическом движении элементов механизма (зубчатых колес, тел вращения, сепаратора или обоймы подшипников качения и др.) приводит к появлению в спектре сигнала комбинационных частот в окрестности основных частот возбуждения, вызванных амплитудной модуляцией.

Спектр анализа развития трещины в теле детали вращения, приводящий к поломке (зубьев колеса редуктора, сепаратора или обоймы подшипника качения), очень похож по своему проявлению на спектр сигнала развития выкрашивания, но скорость развития данного дефекта значительно выше.

Задир контактирующих поверхностей, являющийся следствием увеличения коэффициента демпфирования механической системы, сопровождается мгновенным разогреванием локальных участков, "схватыванием" поверхностей в зоне контакта и последующим наволакиванием материала. Как правило, задир (заедание) развивается при неправильных условиях эксплуатации механизмов: нарушении условий смазки, увеличении нагрузки сверх допустимых пределов, нарушении температурного режима, попадании посторонних предметов в зону контакта. Явление задира приводит к нарушению периодичности движения деталей механизма, флуктуациям скорости вращения,



появлению выбросов в виброакустическом сигнале, явлению фазовой (частотной) модуляции на основных частотах возбуждения.

Большинство методов диагностирования зарождающихся дефектов механизмов имеют в своей основе одну и ту же отправную диагностическую модель: развитие дефекта вызывает в виброакустическом сигнале рост числа и амплитуды кратковременных выбросов сигнала типа ударных импульсов, модулирующих колебания на вынужденных и собственных частотах механизма. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальный способ обработки сигнала для выделения информационных составляющих о развитии повреждения, который сводит к минимуму влияние помех и позволяет однозначно соотнести полученную характеристику сигнала с видом дефекта [2].

Так как структура полимеров отличается от структуры металлов, то соответственно и при подобных дефектах на поверхности будет отличаться и виброакустический сигнал. Поэтому для определения зарождающихся дефектов при работе изделий из полимерных конструкционных материалов моделируется процесс трения при разных условиях работы. Для этого используется испытательный стенд.

На стенде испытывался фторопласт-4 (ГОСТ 10007-80), физические и механические свойства которого приведены в табл. 1. Этот материал применяется для изготовления антифрикционных изделий, которые нашли свое применение в различных областях машиностроения, авиации и космонавтики. Фторопласт-4 применяется также в гидравлике, в том числе поршневых уплотнительных колец, направляющих подшипников скольжения, уплотнительных манжет и т. п. работающих в интервале температур от -60 до +250° С.

Испытательный стенд создан на базе вертикально-сверлильного станка, который был доработан под фрикционные испытания методом торцевой пары трения. Блок-схема стенда приведена на рис. 1.

Таблица 1

Основные физико-механические характеристики фторопласта (Ф-4)

Наименование параметра	Значение
Плотность, г/см ³	2,14-2,26
Температура стеклования, °С	-120
Температура плавления, °С	+327
Предел прочности при растяжении, кгс/см ²	200-300
Предел прочности при сжатии, кгс/см ²	120
Твердость по Бринеллю НВ	3-4
Коэффициент трения по стали	0,02

Образец помещается на подпятник, где надежно фиксируется для предотвращения проворота. Подпятник нагружается в вертикальном направлении

нии посредством подвешиваемого через рычаг груза. Для снятия нагрузочных характеристик служит датчик давления, который через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на ЭВМ строит нагрузочные характеристики. Для снятия виброхарактеристик используется акселерометр, который через анализатор «Агат» снимает виброхарактеристики испытуемого образца. Анализатор, в свою очередь, через интерфейс ЭВМ при помощи программы «Диамант» позволяет анализировать полученные виброхарактеристики. На образец воздействует торцевой элемент вала, приводимый во вращение электродвигателем с изменяемой частотой вращения. Частота вращения также фиксируется датчиком Холла и через АЦП передается на ЭВМ. Такая схема позволяет быстро обрабатывать данные и фиксировать мгновенные изменения в трибопроцессах.

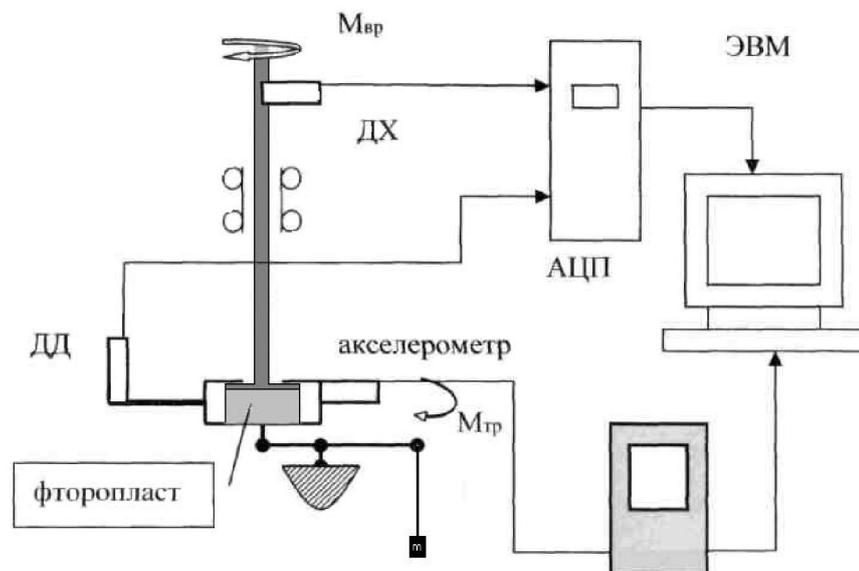


Рис. 1. Блок-схема испытательного стенда

Испытания проводились на разных режимах:

- без нагрузки;
- с номинальной нагрузкой без смазывающего материала;
- с номинальной нагрузкой со смазывающим материалом;
- с разрушающей нагрузкой.

До начала испытаний поверхность образца имела неприработанную поверхность (рис. 2, а) с шероховатостью 2,48 мкм, которая зафиксирована с 10-кратным увеличением на микроскопе «Альтами-1240» в отраженном свете, также фиксировалась масса образца на весах AND HR200 и составляла в начале эксперимента 7,4986 г.

Исследования проводились по спектру виброскорости в диапазоне от 5



до 1000 Гц, который характеризует энергетические характеристики, а также по спектру виброускорения в диапазоне от 5 до 10000 Гц, который характеризует силовые характеристики.



а – до испытаний



б – после номинальной
нагрузки



в – после критической
нагрузки

Рис. 2. Фотографии поверхности фторопласта

На первом режиме испытания велись без нагрузки, с целью получения эталонных виброхарактеристик. На этом режиме просматриваются все дефекты машины трения, при дальнейших исследованиях энергетические возмущения в спектральной области на характерных частотах учитываются только при определении амплитуды. Амплитуда энергетических возмущений характеризует нагрузку, прикладываемую к узлу трения.

На рис. 3 представлен спектр виброскорости машины трения на холостом ходу. По спектру можно определить дефекты машины трения. По спектру можно условно выделить четыре составляющие, которые характеризуют процессы, происходящие при работе машины.

Оборотная составляющая (рис. 3-1) образуется под действием центро-

бежных сил первичной неуравновешенности, вращающийся ротор обретает динамический прогиб, а его подшипники – вибрацию с этой частотой. Двойная оборотная составляющая спектра рис. (3-2) характеризует неперпендикулярность вала по отношению к образцу во время испытаний. Вследствие частичного износа материала плоскость образца претерпевает различные изменения формы, которые ведут к непараллельности трущихся поверхностей. В этом случае происходит «подхватывание» поверхности, которое определяется прибором вибрациями соответствующих частот.

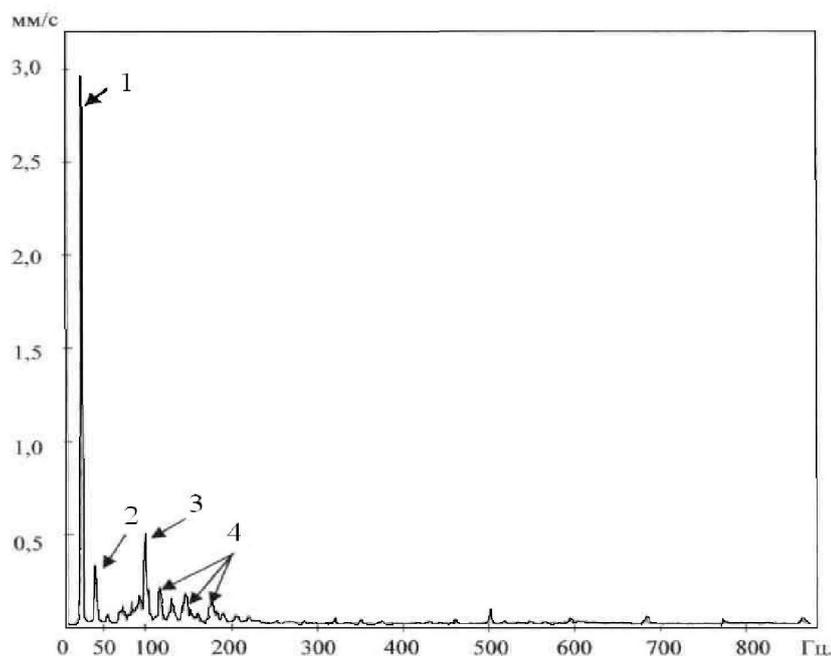


Рис. 3. Спектр виброскорости стэнда на холостом ходу:

1 – оборотная составляющая спектра, равная 12,7 Гц, что соответствует 762 об/мин; 2 – вторая оборотная составляющая спектра, характеризует дефект, проявляющий себя два раза за один оборот вала; 3 – вибрация с полюсной частотой вращения электромагнитного двигателя; 4 – высокочастотная вибрация в диапазоне 120–200 Гц, характеризует дефекты подшипника

Стогерцовая вибрация рис. (3-3), характеризует электрические проблемы электродвигателя, определяющиеся износом подшипников, графитовых щеток и т. д. Высокочастотная вибрация (рис. 3-4), обусловленная множеством пиков на частотах от 120 до 200 Гц, характеризуют дефекты опорного подшипникового узла стэнда, а также указывают на то, что приводной вал трибометра работает с некоторым радиальным биением.



Второй опыт проводился при номинальной нагрузке на материал, при этом замерялся износ материала и шероховатость рабочей поверхности материала. Спектр данного этапа испытаний соответствует графику *б* на рис. 4 и 5. После опыта образец имел шероховатость 0,94 мкм, массу 7,4980 г и массовый износ $6 \cdot 10^{-4}$ г, что говорит о повышенном износе материала вследствие его малой несущей способности.

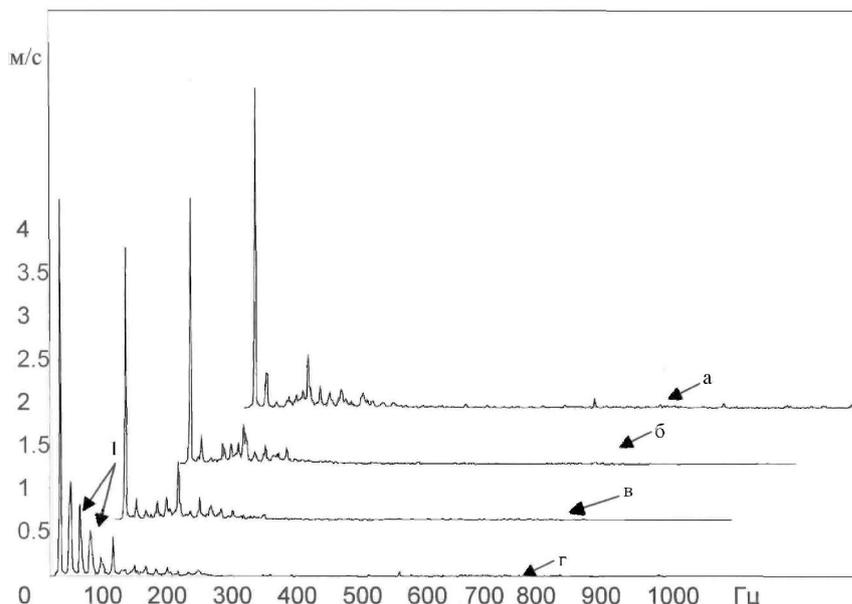


Рис. 4. Каскад спектров виброскорости:

а – виброскорость, соответствующая работе стенда без образца; *б* – номинальный режим испытаний фторопласта-4; *в* – номинальный режим испытаний фторопласта-4 со смазывающим материалом; *г* – режим испытаний фторопласта-4 при разрушающей нагрузке

Третий опыт проводился при номинальной нагрузке на материал со смазывающим материалом (график *в* на рис. 4 и 5), при этом также велся учет параметров износа и шероховатости рабочей поверхности. После опыта образец имел шероховатость 0,83 мкм и массу 7,4983 г, что показывает характер иного процесса трения, чем сухое.

Четвертый опыт проводился при разрушающей нагрузке на материал (график *г* на рис. 4 и 5), имитирующей моменты работы в критических для антифрикционного изделия. После проведения опыта образец имел шероховатость 1,12 мкм и массу 7,6537 г. Данное значение шероховатости свидетельствует о том, что был превышен порог сопротивляемости материала нагружающему усилию, а также о повышенном износе последнего. В данном случае фактически имело место «пластическое резание» (смятие) поверхности материала продуктами износа в зоне трения. Увеличение массы в этом

случае указывает на превышении температуры деструкции фторопласта-4 в рабочем слое во время испытаний и о процессе окисления последнего в зоне фрикционного контакта, что приводит к увеличению молекулярной массы частиц фторопласта-4 рабочего слоя молекулами кислорода воздуха.

Таким образом, с помощью регистрации вибрационных параметров возможно определение рационального режима работы материала во время работы узла скольжения, не прибегая к его разборке, что помогает уменьшить время ремонта данного узла за счет качественного и информативного диагностирования, а также позволяет определить оптимальные условия работы антифрикционного материала в данном узле трения.

Для наглядности виброакустические характеристики представлены каскадом спектров, которые соответствуют последовательности опыта. Из них видно, что при первых трех экспериментах не наблюдается больших изменений в спектральной картине, а только небольшое различие в амплитудах, что указывает на сопротивляемость материала адекватным (некритическим) нагрузкам. Наиболее информативные спектры опыта разрушающей нагрузки показаны на рис. 4 и 5, наблюдается увеличение амплитуды на 1 мм/с, а также добавляются новые энергетические всплески, характеризующие критические режимы работы материала и частичное разрушение несущего покрытия в зоне трения.

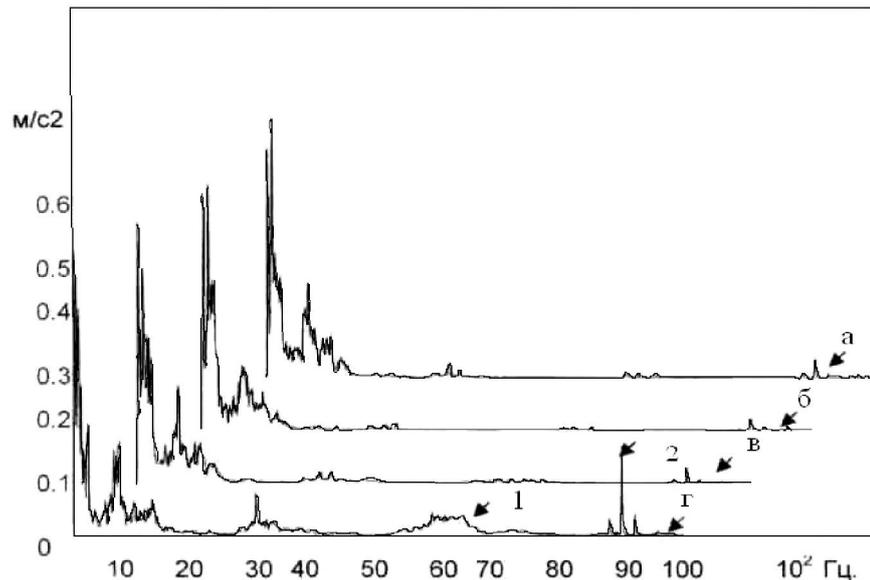


Рис. 5. Каскад спектров виброускорения:

а – виброускорение, соответствующая работе стенда без образца; *б* – номинальный режим испытаний фторопласта-4; *в* – номинальный режим испытаний фторопласта-4 со смазывающим материалом; *г* – режим испытаний фторопласта-4 при разрушающей нагрузке



На каскаде виброускорений (рис. 5), также наблюдаются эти изменения, кроме того, на спектре виброускорения при разрушающей нагрузке видно усиление сигнала дефектов подшипника машины трения в диапазоне частот от 2500 до 3500 Гц и непосредственно сам процесс трения в диапазоне частот от 5500 до 6800 Гц – «1» и на 9000 Гц – «2».

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что применяемый метод исследования актуален для определения разрушающей нагрузки новых материалов, при которой наиболее информативно прослеживается изменение поверхностной структуры образца и ее взаимосвязь со спектральным анализом при снятии спектров виброускорения от 5 до 10000 Гц. Однако этот метод также позволяет вовремя распознать зарождающиеся дефекты на поверхности трения контактирующих деталей в процессе эксплуатации методом неразрушающего контроля, определить нормативные параметры работы изделий из полимерных конструкционных материалов, а также разработать оптимальную конструкцию как узла трения в целом, так и его антифрикционно-го компонента – подшипника скольжения.

Выводы

– Разработан метод изучения внутренней структуры полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения, основанный на виброакустическом анализе процесса физического трения материалов в высоконагруженных узлах трения машин.

– Разработанный метод позволяет на ранней стадии обнаруживать зарождающийся дефект, который в дальнейшем может вывести из строя весь узел.

– Данный метод позволяет оптимизировать и конструкцию узла трения, и подшипника скольжения.

– Разработанный метод прост в применении и не требует больших экономических затрат на свое внедрение.

Планируются дальнейшие экспериментальные исследования в области фрикционного износа материалов, работающих в высоконагруженных узлах трения лесозаготовительной, строительной и другой техники, а также математическое моделирование выявленных зависимостей с целью оптимизации технологических процессов ремонта данной техники и разработка профилактических мероприятий, направленных на предупреждение серьезных поломок. Также планируется промышленное внедрение данного метода в широкое применение. Предполагается, что данный метод способен повысить коэффициент технической готовности подвижного состава лесозаготовительного либо строительного предприятия за счет сокращения текущего ремонта техники.

Работа выполнена по гранту ТОГУ – тема № 04/06, гранту правительства Хабаровского края – тема 15–И–23.



Библиографические ссылки

1. *Виброакустическая* диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий и др. М., 1984.
2. *Неразрушающий* контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. М., 2005.
3. *Генкин М. Д., Соколова А. Г.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М., 1987.
4. *Головкин Г. С., Дмитренко В. П.* Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов. М., 2005.
5. *Иванов В. А., Ри Хосен.* Прогрессивные самосмазывающиеся материалы на основе эпоксиэфторопластов для триботехнических систем. Владивосток; Хабаровск, 2000.
6. *Nair P. D.* Polyurethane-poly (methyl methacrylate) interpenetrating polymernetworks. L Synthesis, characterization, and preliminary blood compatibility studies // J. Appl. Poym. Sci. 1998. V.60, N.9.