

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ РЕЗИН

Р. Салганик, д.т.н., В. Суторшин, Е. Черствов,
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН;
А. Федотов, к.т.н., "МАТИ" – РГТУ им. К. Циолковского, afed83@gmail.com

Для изучения деформирования тонкого приповерхностного слоя резин разработан доплеровско-координатный метод измерения перемещений. Он реализован в оригинальных приборах. Результаты исследований показали, что процесс поверхностного разрушения резиновых шин связан с ростом поврежденности в достаточно тонком приповерхностном слое изнашиваемого материала. В статье обсуждаются вопросы сопряжения результатов, полученных лазерным методом и методом оптической микроскопии, с численными расчетами.

Разработана методика определения упругих свойств тонкого приповерхностного слоя резин, поверхность которых подверглась изнашиванию. В ее основе лазерный доплеровско-координатный метод, который реализован в лазерном доплеровском катетометре и лазерном доплеровском экстензомере.

Изучение процессов изнашивания резиновых шин и путей его снижения является важной задачей для транспортной отрасли. Исследования

этого процесса указывают на его связь с ростом повреждений (трещин, пор и т.п.) в достаточно тонком приповерхностном слое изнашиваемого материала. Поэтому важно изучать процессы развития указанных дефектов как путем их обнаружения и исследований при помощи микроскопии, так и путем проведения экспериментальных и теоретико-расчетных исследований влияния этих дефектов на процессы деформирования и локального разрушения. Для исследования деформирования тонкого приповерхностного слоя резин разработан метод лазерной диагностики. В его основе доплеровско-координатный метод измерения перемещений, реализованный в оригинальных приборах: лазерном доплеровском катетометре (ЛДК) и лазерном доплеровском экстензомере (ЛДЭ). С их помощью были бесконтактно измерены тангенциальные составляющие скоростей и перемещений точек на поверхности твердых тел. Этот метод несет с собой удобство измерений: при измерениях не приходится наносить на поверхность объекта каких-либо меток, и измерения могут проводиться на любых реально шероховатых поверхностях объекта, в том числе при действии агрессивной среды и температур (до $\sim 1000^\circ\text{C}$).

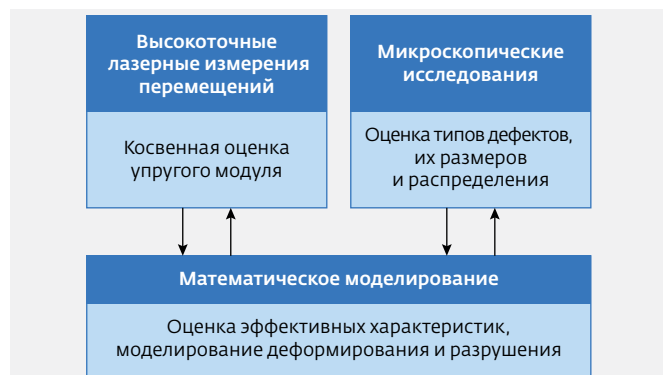


Рис.1. Схема методики диагностики изменений механических свойств приповерхностной области резин

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Кратко уточним принципы разрабатываемой методики (рис.1) лазерной диагностики, более подробно они изложены в работе [1]. Методика предполагает проведение предварительного микроскопического исследования структуры приповерхностного слоя. Информация о типе и характерных размерах и видах дефектов необходима для дальнейших исследований. Для исследований в основном были взяты образцы резин с дефектами в виде трещин.

Второй шаг – это построение математической модели влияния выявленных типов дефектов на деформационные свойства изучаемого материала и смещений на его поверхности. На основе этой модели выполняют обратный анализ и выделяют по его результатам характерные признаки. Они позволяют при диагностике выявить соответствующие дефекты.

Третий шаг – проведение необходимых экспериментальных диагностических тестов с помощью лазерных методов измерений. Теперь по этим результатам в рамках выбранной математической модели можно сделать вывод о наличии конкретных типов дефектов. Следует учитывать, что параметры поврежденного приповерхностного слоя можно определить из косвенных измерений. Так, измерения упругих модулей, проведенные по различным участкам этого слоя, скажут о росте поврежденности. Ведь хорошо известно, что ее рост приводит к падению упругих модулей. Поэтому ценную информацию можно получить,



Рис.2. Лазерный доплеровский измеритель перемещений и деформаций – лазерный доплеровский катетометр (ЛДК)

сравнивая деформирование некоторого тонкого приповерхностного слоя и гораздо более толстого слоя изучаемого материала, содержащего этот тонкий деформируемый слой.

Замыкает методику по принципу обратной связи проверка результатов выполнения предыдущего пункта. Для этого их сравнивают с результатами микроскопических исследований для последующей корректировки математической модели. Так происходит коррек-

тировка методики.

В итоге, по такому алгоритму может быть создана система диагностики физико-механического состояния приповерхностного слоя и его поврежденности дефектами, в первую очередь трещинами. Эта система по мере накопления данных становится в основном неразрушающей системой контроля. Кроме того, со временем она перестает требовать частого внесения в нее коррекций на основе результатов проведения разрушающих исследований.

Основные технические характеристики ЛДК [4]

Характеристика	Значение
Дистанционность, м	0,3
Диапазон перемещений, мкм	500
Погрешность измерений перемещений, мкм	0,5
Погрешность измерений скорости, мм/с	до 0,5
Темп выдачи измерений, Гц	до 20
Входной формат данных	0,1–0,3
Воспроизводимость, мкм	He-Ne / 0,6328

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Лазерный доплеровско-координатный метод. Принцип действия лазерного доплеровского катетометра (ЛДК) (рис.2) и лазерного доплеровского экстензометра (ЛДЭ), базируется на использовании эффекта Доплера в оптическом диапазоне длин волн [2,3]. Согласно этому эффекту, при относительном движении источника излучения и приемника частота волны на стороне приемника (объекта) изменяется на величину доплеровского сдвига частоты, пропорционального скорости этого движения. В приборах используют модифицированный способ обработки сигнала. Его особенность в том, что по доплеровской компоненте сигнала после обработки в процессоре вырабатывается сигнал обратной связи, который управляет параметрами блока модулятора-сканатора.

Измерительная система ЛДЭ имеет два оптических канала: основной и дополнительный. Основной оптический измерительный канал направлен на зондируемый элемент, дополнительный оптический канал формирует реперную точку на объекте исследования. Эта дополнительная точка предназначена для определения смещения зондируемого элемента относительно еще одного репера. Благодаря этому точностные характеристики системы ЛДЭ стали выше, чем у ЛДК (см. таблицу), на порядок.

Мы уже отметили, что для проведения измерений не требуется наносить на поверхность объекта какие-либо метки и т. п. Исследования проводят на любых реальных шероховатых поверхностях объекта (материала, изделия, элемента конструкции) в условиях действия агрессивной среды и высоких температур – до -1000°C .

Высокая точность измерений в реальном масштабе времени достигается за счет использования в рассматриваемом методе соответствующих алгоритмов пространственно-временной обработки лазерного сигнала с применением элементов активной оптики.

ОПЫТЫ ПО ДЕФОРМИРОВАНИЮ РЕЗИН

Эксперименты проводили на резиновых образцах, изготовленных в форме колец. Для проведения испытаний кольцевых образцов на сжатие была разработана и отлажена испытательная установка, позволяющая осуществлять осевое нагружение образцов. В испытаниях образцов использовали программы ступенчатого вида. Каждая программа состояла из ступеней нагружения (разгрузки), которые производились путем почти

мгновенного приложения (снятия) грузов выбранного веса. После каждой ступени нагружения (разгрузки) осуществлялась выдержка продолжительностью от нескольких минут до нескольких десятков минут (первые часы нагружения). Измерения перемещений проводились на боковой поверхности образца. Результаты испытаний (после компьютерной обработки) получают в виде графиков перемещений, измеренных в микрометрах, от времени t . Характерная кривая изображена на рис.3. Данные графики отражают динамику процесса; из них можно определить ряд механических параметров процесса деформирования, например мгновенные упругие модули. Отметим некоторые возможности интерпретации приведенных зависимостей.

- По величине деформаций при приложении/снятии нагрузки можно определить мгновенные упругие модули.
- По характерным временам на участках ползучести можно исследовать влияние вязкости резины на ее деформационные свойства.
- Изменяя положение исследуемой точки по высоте образца, можно исследовать деформационные свойства слоев резины различной толщины. Это может помочь косвенно определить толщину поврежденного приповерхностного слоя резины. В результате измерений было выявлено следующее [5, 6].
- Величины мгновенных упругих модулей при нагружении (сжатии) существенно иные, чем при разгрузке, причем первые обычно значительно выше, чем вторые.
- Для всех исследованных резин кривые типа ползучести, отвечающие выдержке при постоянной нагрузке, имеют различные характерные времена изменения деформаций на

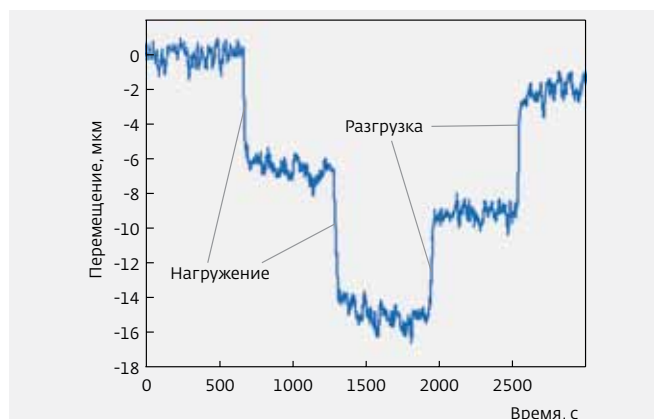


Рис.3. Зависимость "перемещение-время" для ступенчатой программы нагружения



участках нагружения и разгрузки. При этом изменения деформаций, отвечающие нагружению (сжатию), характеризуются временами, многократно меньшими, чем при разгрузке.

- После полной разгрузки образцов-колец от сжимающей нагрузки, действовавшей в течение длительного времени (от десятков минут до нескольких часов), в них сохраняется значительная остаточная деформация сжатия. Величины остаточных деформаций, составляющие 10-40%, зависят от типа резины, уровня нагрузок и продолжительности испытания.
- Мгновенный модуль упругости приповерхностного слоя резин, подвергавшихся изнашиванию, существенно меньше соответствующего модуля основной части материала, что характеризует процесс накопления поврежденности в приповерхностном слое. К примеру, для одного из образцов при одинаковой программе нагружения мгновенный упругий модуль приповерхностного слоя (толщиной 0,5 мм) оказался в 2,6 раз меньше соответствующего модуля основной части материала (толщиной 3,5 мм).

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пока сделаны первые шаги в направлении комплексирования лазерных измерений со структурными исследованиями приповерхностного слоя и математическим моделированием [1]. Важным источником информации о состоянии приповерхностного слоя является микроскопическое исследование вертикальных к нагружаемой поверхности срезов. Исследования проводились путем совмещения оптической и электронной микроскопии при различном увеличении. В ходе исследований были выявлены следующие структурные особенности приповерхностного слоя исследуемых резин, а именно, обнаружено:

- Наличие крайне тонкого (~3-5 мкм) сильно изношенного слоя;
- Наличие ансамбля мелких трещиновидных дефектов (~1-5 мкм);
- Наличие отдельных приповерхностных крупных трещиновидных дефектов (~25 мкм).

В теле, содержащем достаточно плотно расположенные дефекты, особенно в приповерхностном



слое, происходит изменение значений эффективных деформационных характеристик (упругих модулей). Расчет влияния большого числа малых приповерхностных трещин на деформируемость приповерхностного слоя материалов можно выполнить, опираясь на результаты работы [7]. Разработан соответствующий алгоритм расчета компонентов тензора упругой податливости и тем самым – расчёта упомянутых выше модулей. Характеристики материала и трещин (их получаем из результатов оптической микроскопии) используются в качестве входных данных в алгоритм. А на выходе получаются величины компонентов тензора упругих модулей. Также по предложенному алгоритму, зная смещения на поверхности, можно найти эффективные характеристики материала и функции распределения трещин по поверхности.

При этом следует отдельно рассматривать влияние относительно крупных одиночных трещин на напряженное состояние приповерхностного слоя. Это влияние наглядно проявляется в возникновении полей смещений на поверхности тела, когда к нему приложена механическая нагрузка. Для задачи плоской деформации найдены асимптотические выражения для поля смещений на поверхности тела с приповерхностной трещиной. Эти выражения справедливы при выполнении некоторых условий: достаточная малость величины протяженности трещины по сравнению с расстоянием от этой трещины до границы рассматриваемого тела. Таким образом, подготовив базу данных полей смещения по образцам (рассчитанных по асимптотическим формулам), можно в дальнейшем проводить сравнение измеренных смещений на поверхности интересующего нас участка тела с элементами этой базы. Тем самым мы подтверждаем возможность дальнейшей идентификации при появлении гипотетически крупных трещин.

* * *

В статье описан комплексный подход к разработке диагностики состояния приповерхностного слоя резин. Суть подхода заключается в совместном применении методов: лазерного доплеровско-координатного метода, оптической и электронной микроскопии, математического моделирования.

Основное внимание уделено ключевому элементу методики – лазерному доплеровско-координатному методу и реализующим его приборам – лазерному доплеровскому катетометру и лазерному доплеровскому экстензометру. Приведены данные о первых результатах измерений деформирования

резин, в том числе подтверждена принципиальная возможность определять дефект упругого модуля изношенного приповерхностного слоя. Также приведены данные о сопряжении исследований лазерным методом с микроскопическими исследованиями и математическим моделированием.

Следующим перспективным шагом развития методики является привлечение полевых методов (таких как метод спекл-интерферометрии [6]) в качестве дополнительного метода диагностики. Данный метод позволит выявить наиболее интересные участки для изучения локальным методом (прибором ЛДК или ЛДЭ) поверхности диагностируемого образца. Также представляется перспективным улучшение и развитие математической модели. Отметим, что развиваемая методика применима не только к резинам, но и к другим материалам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-08-01148).

ЛИТЕРАТУРА

1. Салганик Р., Мищенко А., Федотов А. Методология физической диагностики свойств подповерхностного слоя резин на основе лазерного доплеровского метода, структурных исследований и математического моделирования: Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано до макроуровня. Ч.1. Материалы 12-й МНТК. – СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2010, с.327.
2. Handbook on Experimental Mechanics: Springer, 2008, 1096p.
3. Cherstov E., Mokhel A., Salganik R., Soutorshin V. Investigation and prediction of creep and creep-like behavior of solids by laser methods. – Trans. ASME, Electronic Packaging, 1992, v. 114, p. 310.
4. Патент РФ №2008108274/11. Лазерный доплеровский измеритель перемещений. Черствов Е., Суторшин В.
5. Мохель А., Суторшин В., Федотов А., Черствов Е. Экспериментальное исследование деформирования резин с помощью лазерного доплеровского метода. – Препринт №920 ИПМех РАН, 2009.
6. Суторшин В., Федотов А., Черствов Е. Развитие методологии лазерных методов исследования деформирования резин. – Препринт №967 ИПМех РАН, 2010.
7. Салганик Р. Механика тел с большим числом трещин. – МТТ, № 4, 1973, с. 149.