

УДК 53.086

Исследование деградации физико-механических параметров конструкционных материалов на примере струн

*Орлова С.Р., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»*

*Научный руководитель: Кошкин А.С., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
komshin@bmstu.ru*

Надежность и долговечность изделий машиностроения во многом определяется показателями качества конструкционных материалов и несущих элементов конструкций. Поэтому большое внимание следует уделять изучению и исследованию таких свойств, как модуль Юнга, модуль сдвига, их уточнению и девиации. [1] В качестве исследуемых образцов в данной статье рассматриваются струнные элементы.

На практике принято считать, что упругие свойства металлических материалов являются структурно нечувствительными характеристиками, связанными с параметрами кристаллической решетки и практически не зависящими от режимов термомеханической обработки, если последние не вызывают аллотропических превращений. При расчетах их принимают за константы. [2]

Немаловажными является оценка свойств конструкционных материалов и их девиации во времени. Традиционные подходы в этой области основаны в большинстве случаев на стандартных методах, приведенных в нормативной документации.

Недостатками данных методов являются:

1 Отбор для измерения стандартных образцов, которые соответствуют требованиям нормативной документации. Такой подход исключает возможность рассмотрения индивидуальных свойств материала, а тем более получение характеристик определенной детали конструкции машины или механизма.

2 Невысокая точность измерения, обусловленная низкой точностью средств измерений, применяемых при исследованиях[3]:

- условный допуск на величину деформации при растяжении – $(0,1 \div 1)\%$ (ГОСТ 1497);

- допуск на предел текучести – $(0,005 \div 1)\%$ (ГОСТ 1497);
- для определения начальной площади поперечного сечения F_0 необходимые геометрические размеры образцов измеряют с погрешностью не более $\pm 0,5\%$ (ГОСТ 1497);
- вычисление механических характеристик по результатам испытаний на кручение проводится с точностью до 1% (ГОСТ 3565);
- измерение нагрузки на испытываемые образцы с погрешностью $\pm 1\%$ (ГОСТ 3565);
- измерение угла скручивания с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5^\circ$ (ГОСТ 3565).

3 Результаты испытаний могут учитываться (п. 4.13 ГОСТ 1497):

- при разрыве образца по кернам (рискам), если при этом какая-либо характеристика механических свойств не отвечает установленным требованиям в нормативно-технической документации на металлопродукцию;
- при разрыве образца в захватах испытательной машины или за пределами расчетной длины образца (при определении относительного равномерного удлинения d_p и относительного удлинения при разрыве d);
- при разрыве образца по дефектам металлургического производства и получении при этом неудовлетворительных результатов испытаний. [4,5]

Таким образом, получение информации о состоянии того или иного объекта возможно только при разрушении испытываемого образца, что недопустимо в реальных условиях эксплуатации.

4 Механические свойства конструкционных материалов, как было сказано выше, известны, в лучшем случае, с точностью до 3-4 значащих цифр, но при этом, даже зная состав того или иного материала, трудно определить его индивидуальные механические характеристики.

Возможен иной подход для исследования свойств материала. Свободные затухающие колебания струны описываются при помощи уравнения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2(t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta(t) \frac{\partial u}{\partial t} , \quad (1)$$

где $c(t)$ и $\beta(t)$ – коэффициенты жесткости и вязкости, соответственно, и при изменении этих коэффициентов также неизбежно будет меняться амплитуда и период колебаний струны. В основе концепции предлагаемого исследования лежит гипотеза о том, что на

скорость деградации могут оказать значительное влияние такие факторы, как, особенности топографии поверхности, особенности в элементном и химическом составах, которые также необходимо учесть. Поэтому на первом этапе исследования необходимо набрать всестороннюю информацию об исследуемых образцах. Концепция исследования представлена на рисунке 1.

Исследования проводились на гитарных струнах, но применение струн не ограничивается только областью музыкальных инструментов: струны так же находят применение и в иных областях, например, существует множество различных струнных тензометров, струнных акселерометров, трещиномеров и других струнных датчиков.

Струнные датчики нашли широкое применение, благодаря своей простоте и невысокой стоимости. В таких датчиках основным элементом, как можно понять из названия, является натянутая струна, так что точность измерений, стабильность и долговечность датчика напрямую зависят от качества используемых струн, поэтому данное исследования является весьма актуальным.

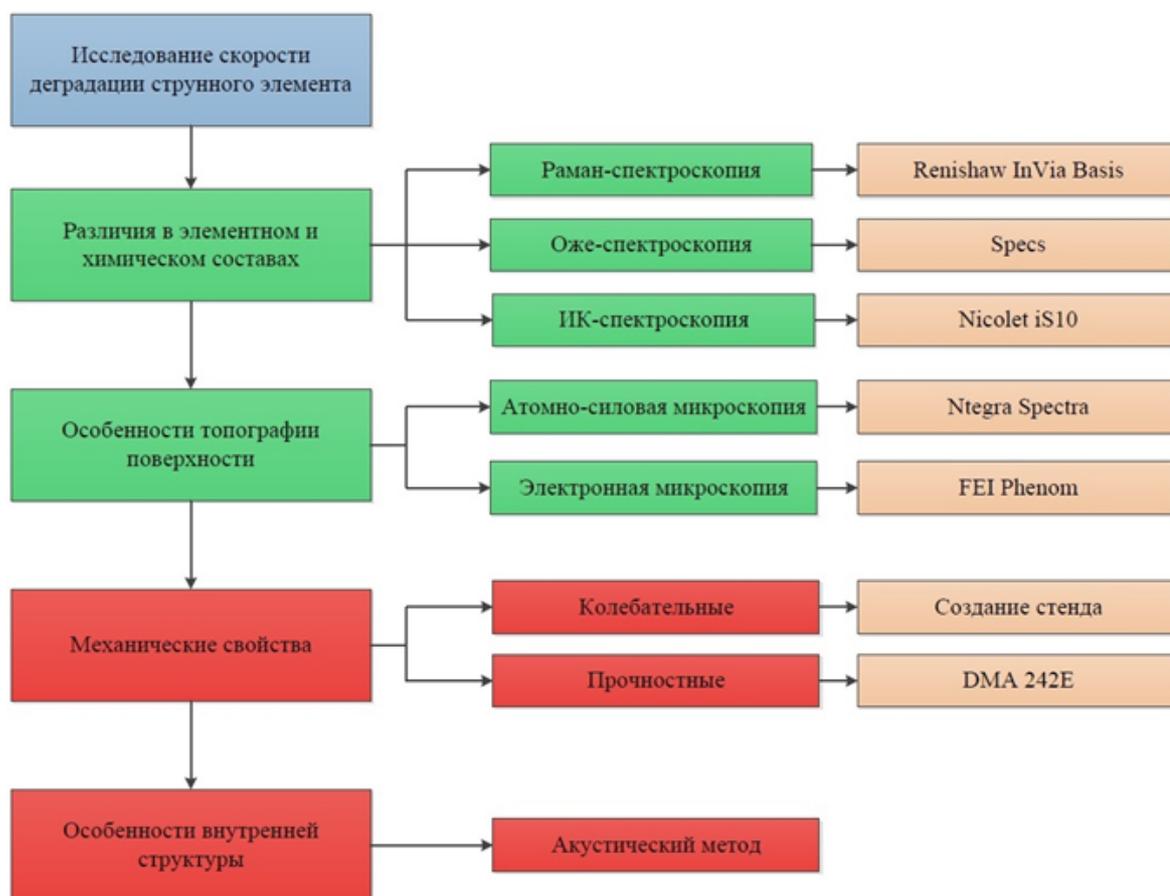


Рис. 1. Концепция исследования

На первом этапе проведено исследование поверхности струн методами атомно-силовой микроскопии (далее АСМ) и растровой электронной микроскопии (далее РЭМ), которые позволили изучить топографию и структуру поверхности струн.

Для сравнения элементного и химического составов были применены методы спектроскопии: Оже-спектроскопии, ИК-спектроскопии.

Вторым этапом является проектирование стенда, при помощи которого можно было бы исследовать механические (колебательные) свойства струн. Структурная схема стенда представлена на рисунке 2. Принцип работы данного стенда следующий: струна закрепляется с одной стороны неподвижно, а с другой стороны предусмотрено регулируемое натяжение. Затем струна выводится из состояния равновесия, после чего она совершает свободные затухающие колебания. Для регистрации периода этих колебаний предусмотрена детектирующая система – излучатель и приемник. Когда струна не пересекает луч света, испускаемый излучателем, на выходе из приемника сигнал максимален. По мере пересечения струной луча, сигнал будет уменьшаться до тех пор, пока не станет равным нулю. Затем интенсивность сигнала снова будет увеличиваться и

т.д. Информация с приемника излучения поступает в блок обработки, а затем на компьютер.

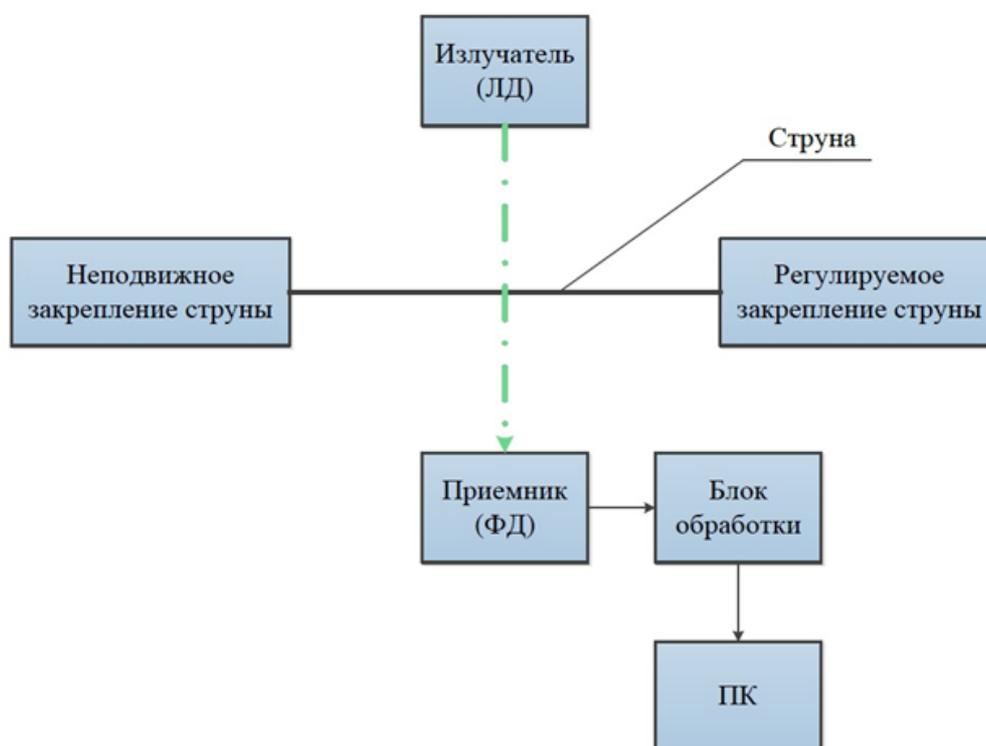


Рис. 2. Структурная схема стенда

Перед началом исследований, опираясь на мнение пользователей в открытых источниках, были отобраны несколько комплектов струн из наиболее выделяющихся линеек производителей: D'addario (USA), GHS (USA), Elixir (USA), а также струны отечественного производителя «Господин музыкант», исследовались струны с обмоткой и без нее. Производителями заявлен одинаковый состав струн: тонкие струны и сердечники всех струн сделаны из стали, обмотка – фосфористая бронза. На двух образцах нанесено дополнительное покрытие, состав которого производителями не раскрывается.

Большинство пользователей оставляли положительные отзывы о долговечности и качестве звучания струн Elixir и D'addario, в то время как струны отечественного производства наоборот часто подвергались критике. Поэтому на данном этапе было интересно выяснить, будут ли видны различия между струнами уже при исследовании топографии поверхности.

На рисунках 3,4 представлены поверхности струн D'addario EXP26 и Господин Музыкант «Бронзовый век», соответственно. Область сканирования 30x30 мкм. Струны без обмотки, без покрытия. Перепад высот в сравнении с зарубежными аналогами

отличается в 2-2,5 раза и в целом структура поверхности очень неоднородна. Можно также отметить, что следов от протяжки практически не видно, что свидетельствует о том, что при изготовлении струн отечественного производителя применяется иная технология.

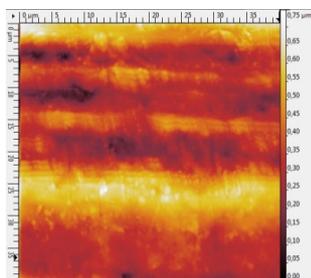


Рис. 3. Топография поверхности струны D'addario EXP26, полученная при помощи АСМ

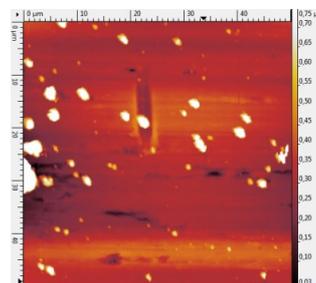


Рис. 4. Топография поверхность струны Господин музыкант «Бронзовый век», полученная при помощи АСМ

Таблица 1

Значения перепадов высот на поверхности струн с обмоткой

| Названия, толщины струн | Максимальное значение, мкм | Среднее значение, мкм |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| D'addario EXP26, (1,07 мм) | 0,87 | 0,31 |
| D'addario EXP26, (0,81 мм) | 0,98 | 0,39 |
| Elixir PolyWeb (0,76 мм) | 0,97 | 0,33 |
| ГМ «Бронзовый век» (0,76 мм) | 2,61 | 0,91 |

Таблица 2

Значения перепадов высот на поверхности струн без обмотки

| Названия, толщины струн | Максимальное значение, мкм | Среднее значение, мкм |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| D'addario EXP26, (0,38 мм) | 0,69 | 0,33 |
| D'addario PL014, (0,36 мм) | 0,58 | 0,31 |
| GHS (0,46 мм) | 0,79 | 0,49 |
| ГМ «Бронзовый век» (0,76 мм) | 1,2 | 0,3 |
| ГМ «Бронзовый век» (0,76 мм) | 1,3 | 0,28 |

При исследовании образцов при помощи РЭМ было выявлено, что поверхность струн Господин Музыкант «Бронзовый век» рисунок 5, обладает значительными дефектами. На остальных образцах подобные дефекты не выявлены



Рис. 5. Изображение поверхности струны Господин музыкант «Бронзовый век», полученное при помощи РЭМ

Исследования струн с покрытием (образцы Elixir PolyWeb и D'addario) было проведено в два этапа с разницей в две недели. При первых измерениях особенностей в структуре поверхности данных струн не было выявлено. Спустя две недели были произведены повторные исследования. При этом в перерыве между исследованиями струны не подвергались никаким механическим воздействиям и в эксплуатацию не вводились. Но, как можно видеть на рисунке 6, покрытие струны D'addario, в отличие от покрытия струны Elixir PolyWeb (рисунок 7), даже до эксплуатации начало интенсивно растрескиваться. Что свидетельствует о том, что покрытие является неэффективным.

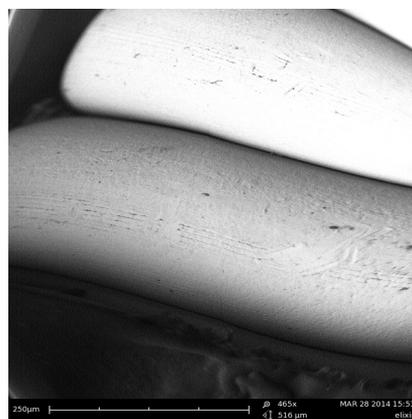
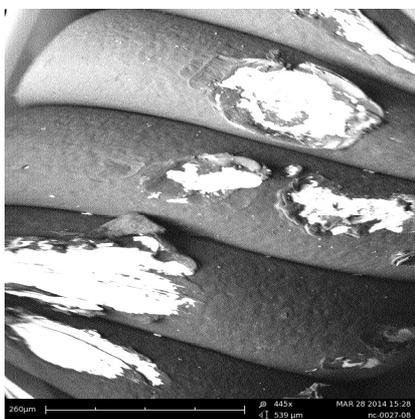


Рис. 6. Изображение поверхности струны D'addario EXP26, полученное при помощи РЭМ

Рис. 7. Изображение поверхности струны Elixir PolyWeb, полученное при помощи РЭМ

Исследование элементного состава проводилось при помощи Оже-спектроскопии, которая показала, что между струнами отечественного и иностранных производителей существенных различий в элементном составе нет. Но данный метод не позволил получить информацию о составе защитных покрытий струн, поэтому для исследования покрытий был применен метод ИК-спектроскопии. ИК-спектры струн Elixir и D'addario представлены на рисунках 8 и 9, соответственно. По результатам исследований было установлено, что покрытие струны Elixir PolyWeb – тефлон, а покрытие струны D'addario – поликарбонат.

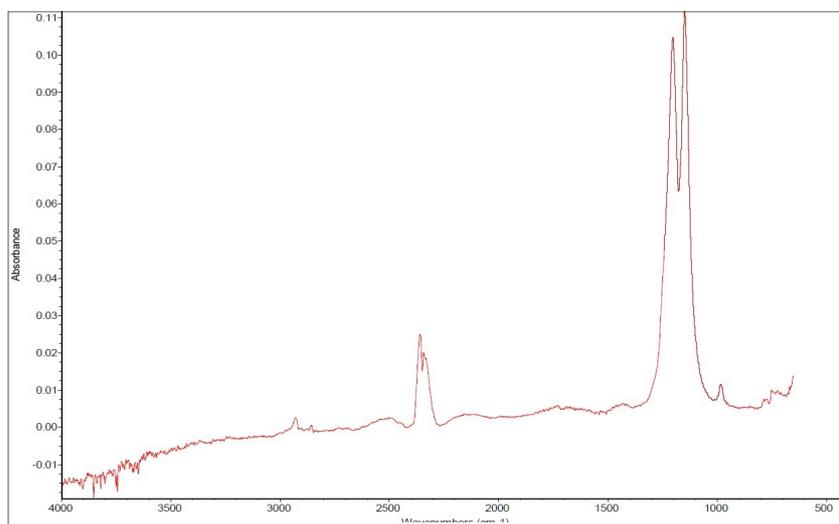


Рис. 8. ИК-спектр покрытия струны Elixir PolyWeb

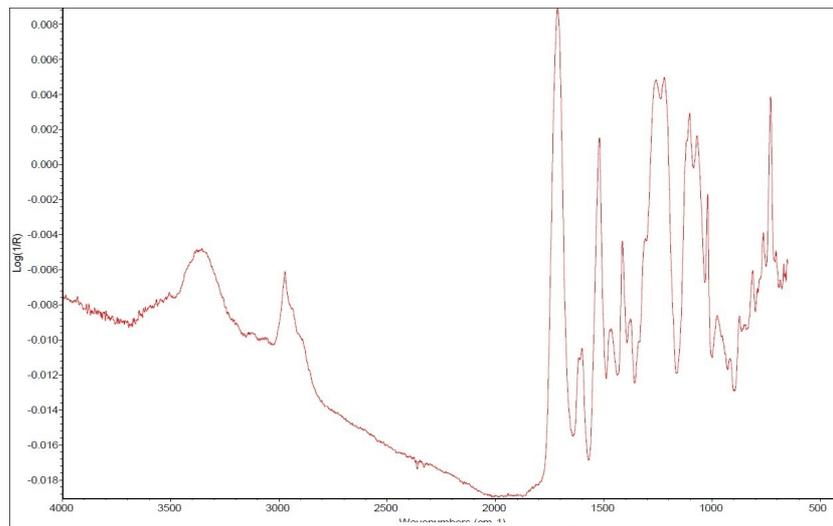


Рис. 9. ИК-спектр покрытия струны Daddario EXP26

По результатам проведенных исследований было установлено, что отечественные струны уступают иностранным аналогам по нескольким параметрам. При помощи АСМ было установлено, что значение шероховатости поверхность струн отечественного производства в 2-3 раза выше, чем у струн иностранного производства, при помощи РЭМ было установлено, что на поверхности отечественных струн есть значительные дефекты, с помощью Оже-спектроскопии было установлено, что с точки зрения элементного состава все струны схожи, а при помощи ИК-спектроскопии был определен состав защитных покрытий и оценено, насколько целесообразно использовать такие покрытия.

Для обеспечения своевременного выявления изменений свойств конструкционных материалов и раннего обнаружения дефектов необходимо проведение непрерывного мониторинга и диагностики, особенно это важно в областях, связанных с безопасностью. В рассмотренном примере, который описывается уравнением (1) коэффициенты $c(t)$ и $\beta(t)$ параметрически зависят от ряда величин: это и шероховатость, и наличие дефектов, и химический состав и другие факторы. Подробно исследуя каждый из этих параметров можно найти корреляционную зависимость между перечисленными факторами и коэффициентами жесткости и вязкости, и в дальнейшем пропадает необходимость проводить весь спектр исследований, достаточно измерять лишь периоды свободных затухающих колебаний. Такой метод позволит диагностировать не только состояние текущий момент времени, а также по известной зависимости от всех исследуемых параметров, давать прогнозы о дальнейшем изменении эксплуатационных свойств конструкционных материалов.

Список литературы

1. Зубцов В.И. Методы определения физических свойств деформируемых материалов с применением пьезо- и электрических систем: дис. ... докт. техн. наук. М., 2005. 289 с.
2. Физические величины: справочник / под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
3. Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Метрологическое обеспечение нанотехнологий в промышленных условиях // Наноинженерия. № 4. 2014. С. 14 – 19.
4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 2008. 49 с.
5. ГОСТ 3565-80. Металлы. Методы испытаний на кручение. М.: Изд-во стандартов, 2006. 17 с.