

Коробко Е. В.
Кузьмин В. А.

*НИИ «Тепломассообмена»
Белорусской академии
наук*

Коробко А. О.

*Белорусский
государственный
университет
информатики и
радиоэлектроники*

Ройзман В. П.

*Хмельницкий
национальный
университет*

УДК 621.382:620.178.3

ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИБРОПЕРЕДАЧИ ПРИ АТТЕСТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статті звертається увага на недоліки закріплення електронних виробів до вібростенду при їх тестуванні на вібрацію і пропонується новий оперативний метод кріплення шляхом використання електрореологічного ефекту.

Paper focuses on demerits in installation of electronic units on vibro-test machine at vibro-testing and represents new installing method by using electric and rheological effect.

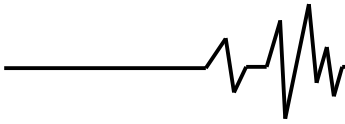
Обеспечение конкурентоспособности выпускаемых электронных изделий на внутреннем и внешнем рынках требует повышения качества их функционирования в условиях воздействия интенсивных механических возмущений. При этом возникает необходимость комплексного рассмотрения проблем организации и проведения виброиспытаний, решения задач их метрологического обеспечения, разработки и внедрения новых методов и средств имитации вибрации, контроля и диагностики испытываемых изделий.

Виброиспытания, основанные на имитации вибрации, относятся к фундаментальным экспериментальным методам, используемым для оценки вибропрочности и виброустойчивости выпускаемых в массовом количестве изделий электронной промышленности. Как правило, проводятся стендовые испытания с использованием специального оборудования. Требования к испытаниям сводятся к обеспечению воспроизведения реальных вибраций или их эквивалентов в диапазоне частот от 0,1 до 5000 Гц, перемещений - от нескольких десятков микрометров до нескольких десятков миллиметров, ускорений - от единиц до нескольких сотен м/с^2 ,

спектральной плотности ускорений - до $10 \text{ м}^2/\text{с}^3$ с погрешностью воспроизведения 10 - 20 % (ускорения, перемещения) и 1,5 - 3,0 дБ (спектральная плотность) и передачи их на различные изделия от элементов, например, резисторов, до целых конструкций.

В соответствии с этими требованиями в настоящее время разработано и эксплуатируется вибрационное и испытательное оборудование и созданы различные методики испытаний, в той или иной мере приближающие условия испытаний к реальным. К ним относятся методы фиксированной и качающейся частоты, полигармонического возбуждения, узкополосного и широкополосного случайного возбуждения, смешанной вибрации.

Современные виброиспытательные системы, действие которых основано на использовании перечисленных методов испытаний, представляют собой сложные комплексы, включающие, в основном, подсистемы задания, управления, воспроизведения, измерения, анализа и регистрации. В некоторые комплексы входят демодуляторы, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, элементы вычислительной техники, усилители, самописцы, несколько мощных



преобразователей электрических колебаний в механические и большое число измерительных преобразователей.

При практическом решении задачи выбора нормируемых точностных характеристик необходимо выделить и рассмотреть те характеристики, которые определяют испытательный режим и влияют на достоверность оценки качества испытываемых изделий. Под режимом вибрационных испытаний понимается совокупность значений параметров, характеризующих форму и ориентацию в пространстве траекторий, и закон воспроизводимого ускорения, скорости и перемещения точек крепления испытываемого объекта к столу вибростенда.

Из этого определения видно, что испытательный режим характеризует: нормированное значение основных воспроизводимых фактических величин; закон колебательного процесса; форму и спектральный состав колебаний, направление колебаний, равномерность распределения механического воздействия в точках крепления испытываемого объекта к столу вибростенда и стабильность значений параметров воспроизводящих физических величин во времени.

Отклонение этих характеристик от номинальных значений приводит к погрешности в результатах испытаний /1/. Во-первых, результат измерения воспроизводимого ускорения будет отягощен дополнительными погрешностями из-за наличия влияющих факторов, которые могут быть соизмеримы, а иногда больше основной погрешности. Во-вторых, при наличии отклонений параметров испытательного режима от заданных испытываемое изделие будет воспринимать дополнительное воздействие от неучитываемых компонентов. Например, при наличии в спектре колебаний стола вибростенда высших гармоник изделие одновременно подвергается воздействиям ускорения на нескольких частотах. Особенно опасен случай совпадения хотя бы одной частоты высших гармоник с частотой собственных резонансов элементов изделия. При этом даже наибольшие уровни гармоник могут привести к выходу из строя испытываемого изделия или его ошибочной отбраковке.

Для количественной оценки степени приближения реального колебательного процесса к заданному надо иметь соответствующие критерии качества воспроизведения параметров испытательного режима. К основным точностным характеристикам вибрационных установок

относят: погрешность воспроизведения ускорения в заданном направлении в контрольной точке; погрешность поддержания заданного ускорения; коэффициент гармоник; коэффициент неравномерности распределения; нестабильность ускорения и частоты во времени. В их состав целесообразно включить: уровень вибрационного шума на столе вибростенда; диапазоны воспроизводимых величин; магнитное поле рассеяния над столом вибростенда и температуру стола вибростенда. Последние две характеристики отражают специфику электродинамических вибростендов.

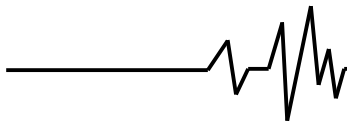
Важнейшим звеном в системе обеспечения качества передаваемых на объект вибровоздействий являются приспособления крепления к источнику вибрации, в частности, к электродинамическому вибростенду.

В промышленности известны и повсеместно используются различные способы и устройства для крепления изделий как при виброиспытаниях, так и в технологии их изготовления. Большая часть из них - это механические крепления, основанные на применении болтов, скобок, струбцин. Главным требованием, предъявляемым ко всем типам крепления, является максимально полное обеспечение передачи механической энергии от стола вибростенда к испытываемому изделию, что соответствует коэффициенту передачи, равному единице во всем рабочем диапазоне виброиспытаний.

Большинство известных механических методов крепления и используемых для их реализации крепежных устройств и приспособлений не удовлетворяет этим требованиям /2/. Их применение, кроме того, создает дополнительные трудности в связи с необходимостью изготовления большого количества оснастки при тестировании многономенклатурных изделий, имеющих различные габариты, форму, и, зачастую, не допускающих повреждения поверхности.

В других случаях для этих целей применяются клеи, смолы, компаунды, что связано с определенными проблемами. Так, использование компаундов требует операции заливки и включает трудоемкую операцию высвобождения изделий от необратимой склейки.

Нами был предложен оперативный и экономичный метод крепления объектов на основе использования электрореологического эффекта /3, 4/, не имеющий указанных недостатков. Суть эффекта крепления изделия к подложке (столу вибростенда) заключается в



быстром обратимом повышении структурных характеристик электрочувствительных жидкотекучих фиксирующих паст в сильных электрических полях в результате объединения частиц наполнителя в прочные «мостики» вдоль вектора напряженности внешнего электрического поля, которые также прочно прикрепляются к электродам. Основными компонентами фиксирующих паст являются неполярная дисперсионная среда с высоким электрическим сопротивлением и твердая мелкодисперсная фаза (< 10 мкм) с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Дисперсионными средами могут служить светлые масла (вазелиновое, трансформаторное), дизэфиры, ароматические углеводороды, парафиновые углеводороды. В качестве дисперсной фазы широко применяют кремнезем в различных модификациях, алюмосиликаты, окислы металлов и другие дисперсные материалы. Важную роль играет дисперсность твердых частиц, наилучшие

результаты достигаются при размере частиц не более 10 микрон. Материал должен быть однородным и без посторонних включений, увеличивающих проводимость. Для указанных дисперсных материалов обязательным является наличие активатора, адсорбирующегося на поверхности частиц. Наиболее распространенным активатором является вода, кроме того могут использоваться амины и т.д. Для практического использования очень важным является стабильность свойств: отсутствие расслоения фаз, изменения агрегационных свойств и электрореологического отклика на электрическое воздействие дисперсной системы во времени. Седиментационная стабильность обеспечивается введением четвертого компонента - поверхностно-активного вещества, тип и количество которого подбираются эмпирически при учете величины поверхности твердой фазы.

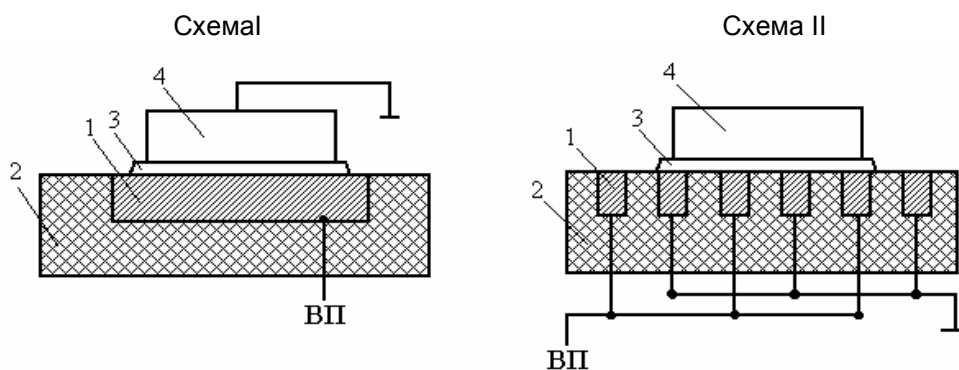


Рис. 1. Схемы крепления детали к электроду через слой ЭР фиксирующей пасты

Конструкции электростатических крепежных приспособлений с фиксирующей пастой - высококонцентрированной электрореологической жидкостью могут быть весьма разнообразны в зависимости от поставленных задач. Их отличительной особенностью является то, что поскольку в них удерживающая сила распределена равномерно по всей поверхности, небольшие изделия можно закрепить на поверхности зажимного устройства независимо от их положения. Такие приспособления с электроуправляемой фиксирующей пастой (ЭР-паста) обладают возможностью крепления изделий из магнитных, немагнитных, металлических и диэлектрических материалов.

Например, если тестируемое изделие изготовлено не из проводящего (рис. 1, схема I), из диэлектрического материала, или имеет

изоляционное покрытие, то на него нельзя подать электрическое напряжение. Поэтому для реализации предложенного метода крепления необходимо или покрыть поверхность детали проводящим лаком, что не всегда допустимо, или может быть рекомендована разработанная нами конструкция приспособления, представленного на рис. 1, схема II

Стальные электроды 1 с плоской поверхностью заделаны заподлицо в непроводящее основание 2 с высоким сопротивлением изоляции. Электроды положительного потенциала (четные) присоединены к клемме однофазного источника переменного тока ВН. Электроды нечетные заземлены. На пленку пасты 3 помещена закрепляемая деталь 4. В случае крепления по схеме I токопроводящая цепь идет



по мостикам из частиц от электрода к детали, а по схеме II – от одного электрода по мостикам из частиц к другому электроду.

Для испытаний конденсаторов цилиндрической формы может быть использовано приспособление, изображенное на рис. 2. Высокое напряжение подводится к клеммнику. Испытуемые конденсаторы располагают в основании в углублениях цилиндрической формы, повторяющих профиль поверхности конденсатора. Между металлическим вкладышем и конденсаторами находится электрочувствительная фиксирующая паста, твердеющая при подаче высокого электрического напряжения. Приспособление устанавливается на рабочий стол вибрационного стенда для проведения испытаний.

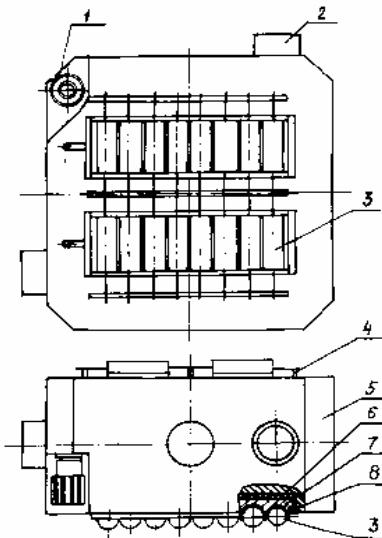


Рис. 2. Устройство для фиксации конденсаторов при виброиспытаниях:
1 – клеммник; 2 – электрозащита;
3 – конденсаторы; 4 – выводы конденсаторов; 5 – основание,
6 – изолятор; 7 – вкладыш;
8 – ЭР- паста

Для получения достаточно прочного сцепления детали с электродами необходимо обеспечить прочность структуры пасты в электрическом поле и достаточную силу взаимодействия частиц наполнителя с поверхностями электродов и детали. Известно, что прочность структуры электрореологических жидкостей зависит от ее состава и напряженности электрического поля. Очевидно, что общая прочность структуры складывается из прочности одного контакта, умноженной на

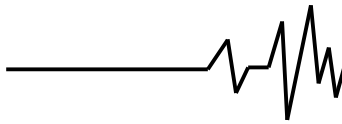
число контактов частиц друг с другом в единице объема пасты. Первая часть задачи решается с помощью выбора наиболее эффективных электрочувствительных наполнителей, как известных рецептур, так и путем целенаправленного их создания, в частности, получением наноразмерных композитных наполнителей с развитой поверхностью или при модификации их поверхности путем адсорбции активаторов.

В случае создания электрочувствительных фиксирующих паст в качестве дисперсной фазы могут быть использованы как неорганические вещества, например кристаллогидраты, в которых активатором является связанная вода, так и полимеры с адсорбированным активатором, либо имеющие необходимые поляризационные свойства в объеме вещества. Сохранение текучести паст достигается добавлением оживителя, что важно, поскольку сохранение прочности крепления детали к электродам при увеличении толщины слоя пасты требует использования большей напряженности электрического поля, что не желательно с позиций энергосбережения и обеспечения безопасности проведения испытаний. Кроме того, устойчивость структуры уменьшается с увеличением высоты мостиков.

Нами были проведены эксперименты с использованием состава фиксирующей пасты, включающей в качестве главных компонентов природный кремнезем и минеральное масло. Порошок наполнителя предварительно подвергался мокрому помолу, отмачивался и просеивался через сито до приобретения равновесной влажности. В обезвоженном трансформаторном масле растворялось поверхностно-активное вещество. После смешивания с наполнителем фиксирующая паста тщательно перетиралась. Готовая для крепления суспензия обычно представляет собой довольно густую пасту, приобретающую текучесть уже при слабом деформировании.

ЭР-фиксирующая паста наносилась тонким слоем на контактную поверхность подложки, после чего испытываемое изделие прижималось сверху с некоторым усилием и между ними создавался электрический потенциал. Наложение потенциала от 0,5 до 5 кВ достаточно для закрепления детали.

Опыты показали, что прочность крепления детали зависит не только от прочности структуры, но и от силы сцепления пасты с поверхностями электродов и детали. Можно улучшить сцепление фиксирующей пасты с электродами в электрическом поле, покрывая их поверхность окисной пленкой,



которая одновременно защищает электроды от электрического пробоя. Так, электроды из алюминиевых сплавов подвергались твердому анодированию на глубину 30–80 мкм. Для улучшения сцепления фиксирующей пасты с поверхностью диэлектрической детали на нее наносили специально разработанное лаковое покрытие, имеющее достаточную адгезию к большинству диэлектриков и обеспечивающее необходимые для крепления тип и величину проводимости детали.

Прочность крепления детали (величина фиксирующего усилия) к электродам оценивалась по величине предельного сдвигового усилия при приложении к ней сдвигающей силы. На рис. 3 приведена схема установки для определения величины фиксирующего усилия. При испытаниях вначале очищается поверхность электродов 1, закрепленных в диэлектрическом основании, и детали 2 (протиранием тканевым тампоном с растворителем), затем наносится слой лака на поверхность детали 2, если это нужно. Далее на поверхность детали наносится тонкий сплошной слой фиксирующей пасты, и по этому слою деталь плотно притирается к электродам. Через несколько секунд после подачи напряжения процесс крепления можно считать завершенным. Привод 3 (рис. 3) передает поступательное движение ($V = 0.04$ мм/с) каретке 4. Величина фиксирующего усилия измеряется датчиком 5 и фиксируется самописцем 6. Крепление диэлектрических материалов осуществляется по схеме II.

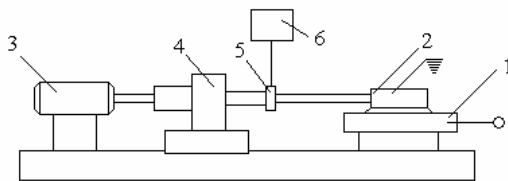


Рис. 3. Схема установки для определения фиксирующего усилия

На рис. 4 представлена зависимость удельного фиксирующего усилия алюминиевой детали от приложенного электрического напряжения (схема I, рис. 1). Толщина диэлектрического слоя оксида алюминия, покрывающего электроды, составляла 35 мкм, что оказалось недостаточным, так как при подаче напряжения электрического поля, выше 1500 В происходил электрический пробой. Однако до 1500 В фиксирующие усилия

достигают максимума. При толщине диэлектрического слоя 75 мкм фиксирующее усилие значительно снижается, т. к. велико электрическое сопротивление слоя.

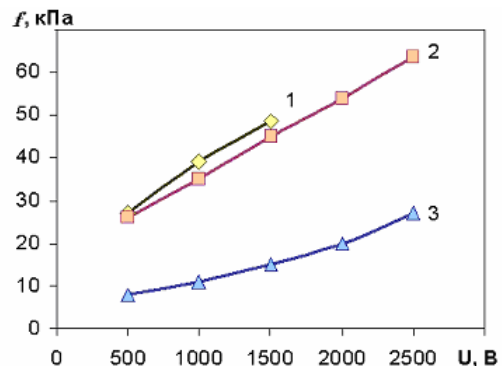


Рис. 4. Зависимость удельного фиксирующего усилия при креплении алюминиевой детали от напряжения электрического поля: 1 – толщина диэлектрического покрытия электрода 35 мкм, 2 – 50, 3 – 75

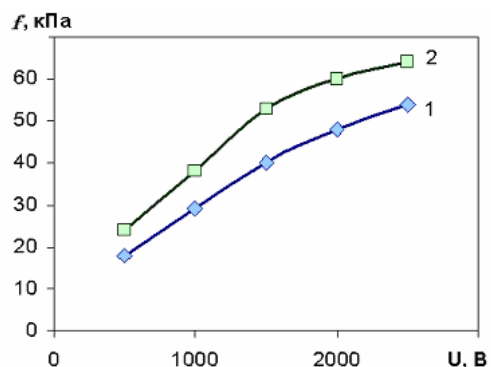
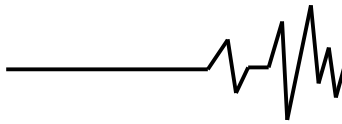


Рис. 5. Зависимость удельного фиксирующего усилия при креплении детали из асбоцемента от напряжения электрического поля: 1 – без покрытия, 2 – с лаковым покрытием

Зависимость величины удельного фиксирующего усилия для диэлектрической детали из асбоцемента без покрытия и с лаковым покрытием от величины приложенного электрического напряжения (схема II, рис. 5, ширина электрода 2 мм, ширина диэлектрического зазора 2 мм) приведена на рис. 4.

Испытания показали, что очень важно обеспечить параллельность поверхностей детали и электродов, ровный (без разрывов) слой ЭР-пасты должен быть не толще 50 мкм.



На рис. 6 изображена графическая запись изменения фиксирующего усилия во времени, характерная для крепления детали из асбоцемента с лаковым покрытием (схема II, рис. 1). Для зависимости фиксирующего усилия от времени воздействия сдвигающей силы на деталь характерны три участка: I – жесткое крепление, II – вязко-пластичный сдвиг жидкости и III – срыв детали, характеризующий разрыв сплошности слоя фиксирующей пасты. Рост напряжения электрического поля приводит к увеличению фиксирующего усилия, при высоких напряжениях ($U > 2500$ В) возможно снижение усилия – происходит «хрупкий скол» пасты с поверхности детали или электродов подложки. Выбор оптимального состава фиксирующей пасты, способа обработки электродов и поверхности детали, отработка технологии крепления позволяют получить значения удельного фиксирующего усилия крепления поверхности детали около 60 кПа, что значительно выше результатов, представленных в работе [5].

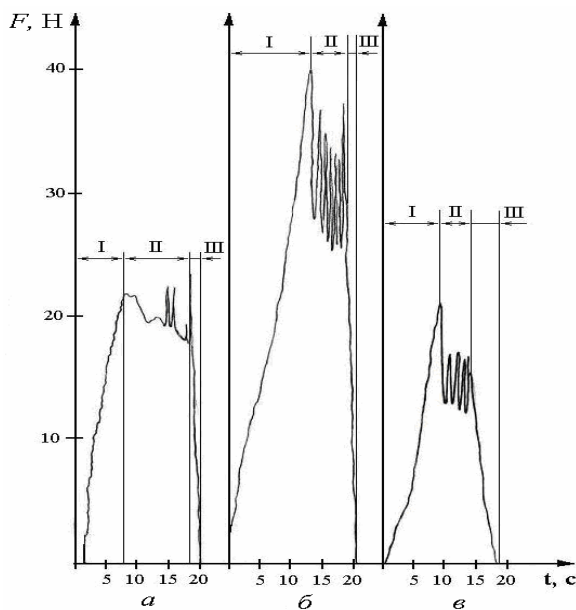


Рис. 6. Графическая запись изменения фиксирующего усилия во времени: а – $U = 1500$ В, б – 2500 , в – 3000

Данная технология может быть применена для крепления деталей при механической обработке, в радиоэлектронной промышленности при проведении механических испытаний, в частности вибротестировании микросхем, конденсаторов и т. п.

Исследования вибрационных характеристик электростатических крепежных устройств с ЭР-пастой проводились в

лабораторных условиях на резонансном столе электродинамического вибростенда ВЭДС - 10А. Эскиз установки приведен на рис. 7.

Как показано на рисунке, А - направление вибрации; Б - металлический образец массой m , укрепленный по площади контакта S на диске стола; В - направление поджима диска для изменения его резонансной частоты, g_1, g_2, g_3 - датчики ускорения. Изучалась частотная зависимость коэффициента передачи механических нагрузок, который определяется как отношение выходного значения амплитуды сигнала датчика ускорений ко входному значению (на столе вибростенда) $K = g_1 / g_2$.

При этом использовались алюминиевый образец с диаметром $d = 40$ мм, толщиной $h = 15$ мм, $m = 51,5$ г, $S = 12,55$ см², и стальной образец с параметрами: $d = 40$ мм, $h = 15$ мм, $m = 135$ г, $S = 12,55$ см².

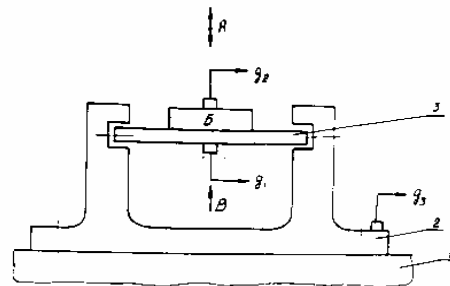


Рис. 7. Эскиз резонансного стола для исследования коэффициента передачи механических нагрузок ЭР-методом крепления изделий: 1 – платформа вибростенда; 2 – резонансный диск; 3 – крепежный диск стола

На рис.8 представлена характеристика коэффициента передачи системы в диапазоне частоты вибрации 1 - 5000 Гц.

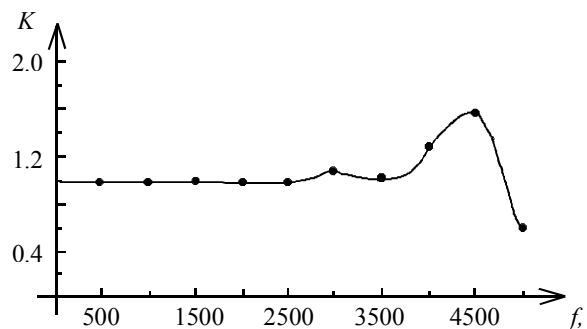
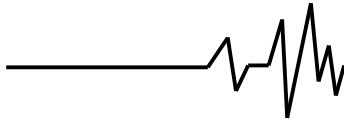


Рис. 8. Передаточная характеристика диска резонансного стола



Коэффициент передачи сохраняет значение $K=1$ в диапазоне частот до 3800 Гц, что соответствует надежному креплению объекта при виброиспытаниях и выполнению нормативных требований.

Литература

1. ГОСТ 20. 57.406-81 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехники.

2. Артемьев Б.Г. , Голубев С.М. Справочное пособие для работников

метрологических служб. 1990.-Т.2 - с. 661 - 673. М.: Изд-во стандартов.

3. Лыков А.В. Электрореологический эффект. 1972. - 176 с. Минск: Наука и техника.

4. Коробко Е.В. Электроструктурированные (электрореологические) жидкости: особенности гидромеханики и возможности использования. 1996. - 189 с. Минск : АНК ИТМО.

5. Tanaka H., Kakinuma Y., Aoyama T., Anzai H. A Study on Fixing Force Generation Mechanism of ER Gel // Book of abstract 11th Intern. Conf. on ERM-2008, Dresden, Germany, 25–29 August 2008.