

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ МАГНИТО-РЕОЛОГИЧЕСКОГО ЭЛАСТОМЕРА ДЛЯ ВИБРО-ИЗОЛЯЦИИ В ВАКУУМЕ**

**А.М. Базиненков,  
Д.А. Иванова,  
И.А. Ефимов,  
А.П. Рогарь**

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Ул. 2-я Бауманская, д.5 стр.1,  
Москва  
105005  
ambazinenkov@bmstu.ru

*Магнитореологический эластомер применяется в системах виброизоляции и амортизации, перспективным является использование платформы активной виброизоляции в вакууме для обеспечения вибрационной защиты объекта исследований. Полимер является композитным материалом, реологические свойства которого могут изменяться под действием направленного магнитного поля. Для корректной работы платформы необходимо постоянство механических свойств, которые могут изменяться при обезгаживании с повышением температуры. В работе представлены результаты исследований механических свойств МРЭ с различным составом до обезгаживания в вакууме. Установлено, что модуль упругости полимера напрямую зависит от концентрации частиц наполнителя, зависимости от наличия ПАВ не обнаружено.*

**Ключевые слова.** Система активной виброизоляции; магнитореологический эластомер; модуль упругости; механические свойства; деформация; вакуумная камера

**1 Введение**

В вакууме проводятся технологические процессы, испытания и исследования, с использованием высокоточных измерительных и технологических приборов. Для повышения точности проводимых исследований и защиты оборудования необходимо использование систем виброзащиты в вакууме.

Сотрудниками кафедры Электронные технологии в машиностроении МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана ведется разработка платформы активной виброизоляции, в конструкции которой имеется 4 демпфера, рабочим телом которых являются диски МРЭ (рисунок 1) [1]. Перемещение верхней плиты с защищаемым объектом виброизолирующей платформы осуществляется за счёт деформации МРЭ под действием направленного магнитного поля.



Рисунок 1. Общий вид платформы без верхней крышки и твердотельная модель демпфера в разрезе

Магнитореологический эластомер (МРЭ) – полимерный материал, наиболее широко применяемый в системах виброизоляции и амортизаторах. Под действием направленного магнитного поля происходит деформация полимера и перемещение объекта, таким образом реализуется полуактивная виброизоляция. На сегодняшний день предполагается возможным использование систем виброизоляции на основе МРЭ в вакууме, для повышения точности проводимых испытаний и исследований.

Таким образом, необходимо знать, как будут изменяться механические свойства МРЭ при обезгаживании в вакууме и повышении температуры. В ходе настоящей работы были рассмотрены различные составы

полимера и изучены их механические свойства до помещения в вакуум.

## 2 Механические свойства МРЭ при повышении температуры

На сегодняшний день проведено большое количество исследований по изучению изменения механических свойств, под действием направленного магнитного поля и без него, при различных температурах. В 2015 году Б. Джу и др. [2] проводили испытания по исследованию влияния высоких температур на механические свойства. В результате чего, было выявлено, что при наличии внешнего магнитного поля происходит увеличение магнитореологического эффекта с увеличением температуры, это можно объяснить увеличением свободы частиц наполнителя, что позволяет им более свободно перемещаться и ориентироваться по направлению действующего магнитного поля.

Наиболее хорошо видно увеличение модуля упругости у изотропных образцов МРЭ при температуре свыше  $50^{\circ}\text{C}$  [2]. Однако, при повышении температуры фиксируется неблагоприятный факт, образцы после длительно пребывания в условиях повышенных температур, после приложения внешней нагрузки длительное время не восстанавливают свою форму, при низких нагрузках данный процесс обратим, с повышением температуры образцы возвращают форму. Также, было замечено, что без приложения внешнего магнитного поля, модуль упругости с повышением температуры волнообразно снижается, относительно начального значения.

Сформированные данные являются неблагоприятными для использования материала при температурах свыше  $200^{\circ}\text{C}$  и давлении менее  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. Однако необходимо изучение влияния совокупности параметров, а также зависимости при различных концентрациях наполнителя.

## 3 Изготовление экспериментальных образцов

Исходные образцы МРЭ были изготовлены в лаборатории ГНЦ РФ АО ГНИ-ИХТЭОС и испытаны в вакууме. Испытания показали наличие большого потока выделяющихся газов, что не позволило достичь высокого вакуума в испытываемой камере с образцами. Было сделано допущение о присутствии большого количества побочных масел, которые также были обнаружены на стенках камеры [3].

Задача сводится к необходимости разработки такого состава полимера, чтобы он обладал необходимыми для виброизоляции механическими свойствами, а его газовыделение в вакууме было минимально и в нем не происходило значительного изменения механических свойств.

Основными компонентами магнитореологического эластомера являются силиконовая матрица и частицы карбонильного железа. Помимо них в состав входят – полиметилсилоксановая смазка (ПМС), отвердитель, петролейный эфир. ПМС необходим для разделения частиц мелкодисперсного порошка карбонильного радиотехнического железа (ГОСТ 13620-79) и для предотвращения появления агломератов. Петролейный эфир используется для удаления (выжигания) излишков масла при полимеризации. Однако, основываясь на предыдущих вакуумных испытаниях, был сделан вывод о значительной степени специфических газов, возможным источником которых может быть ПМС и петролейный эфир. Для сравнения механических свойств и выделяющихся газов, для анализа образовавшейся структуры принято решение об изготовлении образцов с использованием ПМС и эфира, а также без использования этих компонентов (таблица 1).

Таблица 1. Концентрация частиц наполнителя

Обознач.	Концентр. наполн., %	ПМС, %	Эфир, %	Компаунд, %	Отвердит., %
30Б	30	-	-	63,64	6,36
40Б	40	-	-	54,55	5,45
30С	30	0,6	6	57,64	5,76
40С	40	0,8	8	46,55	4,65

С учетом концентраций было изготовлено 8 образцов для испытаний на растяжение (ГОСТ Р 56785- 2015), по два каждого состава. Для формирования образцов использовалась плоская форма (рисунок 2). Процесс заливки и полимеризации мог проходить не равномерно и вызвать разброс толщины образцов. Для получения в дальнейшем сравнимых результатов все образцы были предварительно измерены – толщина и ширина рабочей зоны.

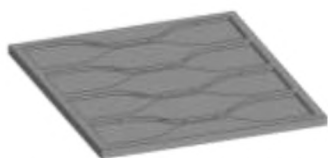


Рисунок 2. Твердотельная модель формы для образцов на растяжение

#### 4 Определение механических свойств

Все образцы были испытаны на электродинамической испытательной машине ElectroPuls E1000, предназначенной для статических и динамических испытаний широкого диапазона материалов и компонентов, в лаборатории кафедры РК-5 Прикладной механики (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Для определения модуля упругости полимера на растяжение был проведен статический эксперимент на растяжение без разрыва, со скоростью растяжения 5 мм/ мин и удлинением на 15 мм.

По полученным экспериментальным данным построены графики зависимости удлинения от прилагаемой нагрузки. Данная зависимость имела линейный характер, что удовлетворяет закону Гука [4].

С целью получения сравнимых графиков, экспериментальные данные были преобразованы в зависимости напряжения от деформации. Полученные графики также имеют линейную зависимость. Для двух образцов, имеющих одинаковый состав, были построены усредненные прямые зависимости деформации от напряженности (рисунок 3).

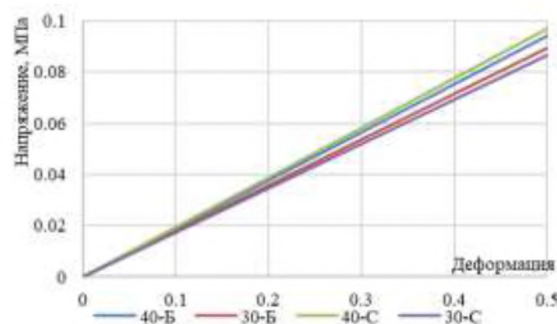


Рисунок 3. Усредненные графики зависимости напряжения от деформации для образцов с ПМС и без него

Для образцов получены следующие усредненные модули упругости: 40 - Б – 0,19 МПа (40% железа, без ПМС и эфира); 30 - Б – 0,17 МПа (30% железа, без ПМС и эфира); 40 - С – 0,19 МПа (40% железа, с ПМС и эфиром); 30 - С – 0,17 МПа (30% железа, с ПМС и эфиром). По графикам видно различие в наклоне для образцов с ПМС и без него, однако отличие их модулей упругости не превышает 12%. Также видно, что нельзя однозначно сказать, как влияет наличие ПМС и эфира в составе МРЭ на модуль упругости.

Таким образом, более подходящей концентрацией для системы активной виброизоляции, имеющей большой модуль упругости, считаем концентрацию наполнителя 40%. По результатам эксперимента нельзя однозначно сказать, как влияет ПМС, который может быть в процессе обезгаживания удален, на механические свойства, поэтому при дальнейших исследованиях характеристик МРЭ в условиях вакуума целесообразно использовать все рассмотренные в настоящей работе образцы.

## 5 Заключение

Новые образцы магнитореологического эластомера были изготовлены по ранее разработанной технологии. Полученные образцы были испытаны на растяжение на электродинамической испытательной машине без разрыва.

Определен модуль упругости для каждого из образцов и установлено, что при нормальной температуре упругие свойства МРЭ имеют линейный характер. При этом модули упругости для различных составов и концентраций рассматриваемого МРЭ отличаются незначительно. Влияние наличия ПМС и эфира на механические свойства МРЭ не выявлено.

В дальнейшем планируется проведение испытаний в вакууме – нагрев и обезгаживание, для сравнения потоков газов из образцов с различным составом и концентрацией, а также определение модуля упругости полимера после его обезгаживания.

## Список использованных источников

- [1] Bazinenkov, A. M., & Mikhailov, V. P. (2015). Active and semi active vibration isolation systems based on magnetorheological materials. *Procedia Engineering*, 106, 170-174.
- [2] «Temperature-dependent dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers under magnetic field». Benxiang Ju, Rui Tang, Dengyou Zhang, Bailian Yang, Miao Yu, Changrong Liao. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 374 (2015) 283–288
- [3] Иванова Д.А., Ротарь А.П., Базиненков А.М. (2019). Исследование газовой выделения магнитореологического эластомера при прогреве в вакууме. *Материалы Девятой Российской студенческой научно-технической конференции*, 65-66.
- [4] Ефимов И.А., Иванова Д.А., Ротарь А.П. Исследование механических свойств магнитореологического эластомера после обезгаживания в вакууме// Двенадцатая Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов (с международным

участием) «Будущее машиностроение России» (Москва, 24-27 сентября 2019г.): сборник докладов/Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019 – С. 450-454.



**STUDY OF ELASTIC PROPERTIES OF A MAGNETO-RHEOLOGICAL ELASTOMER FOR VIBRO-INSULATION IN VACUUM**

**A.M. Bazinenkov,  
D.A. Ivanova,  
I.A.Efimov,  
A.P. Rotar**

BMSTU  
ul. Baumanskaya 2-ya, 5/1, Moscow  
105005  
ambazinenkov@bmstu.ru

*Magnetorheological elastomer is used in vibration isolation and damping systems; it is promising to use a platform of active vibration isolation in a vacuum to provide vibration protection for the research object. Polymer is a composite material whose rheological properties can change under the influence of a directed magnetic field. For the correct operation of the platform, the constancy of mechanical properties is necessary, which can change during degassing with increasing temperature. The paper presents the results of studies of the mechanical properties of MRE with various compositions prior to degassing in a vacuum. It was found that the elastic modulus of the polymer directly depends on the concentration of filler particles, and no dependence on the presence of surfactants was found.*

**Keywords:** *Active vibration isolation system; magneto-rheological elastomer; elastic modulus; mechanical properties; deformation; vacuum chamber*

**References**

- [1] Bazinenkov, A. M., & Mikhailov, V. P. (2015). Active and semi active vibration isolation systems based on magnetorheological materials. *Procedia Engineering*, 106, 170-174.
- [2] «Temperature-dependent dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers under magnetic field». Benxiang Ju, Rui Tang, Dengyou Zhang, Bailian Yang, Miao Yu, Changrong Liao. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 374 (2015) 283–288
- [3] Ivanova D.A., Rotar A.P., Bazinenkov A.M. (2019). Study of gas evolution of a magnetorheological elastomer during heating in a vacuum. *Materials of the Ninth Russian Student Scientific and Technical Conference*, 65-66.
- [4] Efimov I.A., Ivanova D.A., Rotar A.P. A study of their own magnetorheological elastomer after degassing in a vacuum // Twelfth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with international participation) “The Future Engineering of Russia” (Moscow, September 24-27, 2019): collection of reports / Russian Engineering Union, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University). - Moscow: Publishing house of MGTU im. N.E. Bauman, 2019 - S. 450-454.