

УДК 543.271; 533.5.08

А. И. Горбунов, В. П. Михайлов,  
Г. В. Степанов, Д. Ю. Борин,  
А. А. Андриянов, Д. В. Темнов,  
Д. А. Семеренко

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И НОВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СИЛИКОНОВЫХ КОМПОЗИТОВ**

*Описан способ получения магнитоэластичного композита, его основные свойства: деформация в неоднородных магнитных полях в стационарных и динамических режимах, изменение модуля упругости в однородных магнитных полях, магнитострикция и эффект памяти формы, анизотропия упругости композита, синтезированный в магнитном поле. Рассмотрена возможность его применения в качестве активного демпфирующего устройства. Представлены описание конструкции, характеристики и результаты исследований демпфера на основе магнитоэластичного композита.*

Магнитоэластичный композиционный материал — сравнительно новый материал, синтезированный в последнее время и представляющий собой композицию на основе высокоэластичной полимерной матрицы и магнитного наполнителя. Особенности состава данного композита позволяют проявиться комплексу его новых, ранее неизвестных свойств, а именно: под действием магнитного поля материал способен значительно деформироваться и изменять свои упругие свойства, а также обладает эффектами магнитострикции и памяти формы.

Такой тип материала относится к разряду так называемых “умных” материалов (smart materials). По совокупности свойств и в зависимости от того, какое свойство изучается, композит называют по-разному — магнитоэластичный композит или магнитоэластик [1–6], магнито-реологический эластомер [7–12], эластомер–ферромагнитный композит [13], магнитный гель [14, 15], эластичный магнит [16, 17], ферроэласт [18, 19], магнитострикционный гель [20], но пока нет еще устоявшегося термина. Настоящая статья является продолжением работ по изучению магнитных жидкостей, магнито-реологических суспензий [21] и магнитоэластов [22]. Магнитоэластичный композит (МЭК) по своим свойствам является промежуточным материалом между текучими магнитными жидкостями и жесткими магнитоэластами. Первые публикации и интенсивные исследования в этой области были проведены фирмами “Ford” и “Lord Corporation” как продолжение работ

по магнитореологическим суспензиям [7–9]. В Будапештском университете был получен магнитный гель на основе водного сополимера поливинилового спирта и метилметакрилата с наполнителем из ультрадисперсных частиц магнетита диаметром 10 нм.

Отличительная особенность разработанного авторами МЭК — наличие высокоэластичной матрицы, как у магнитных гелей, и высокая намагниченность, как у магнитореологического эластомера. Это сочетание и определяет комплекс его уникальных свойств.

Основной областью применения МЭК является использование его в активных демпфирующих устройствах, амортизаторах автомобилей [7, 8]. Магнитодеформационный эффект можно использовать при конструировании микродвижителей, клапанов и перистальтических насосов. Следует ожидать, что эффекты магнитострикции и памяти формы также найдут применение.

В настоящей статье кратко описан способ получения МЭК и его основные свойства: деформация МЭК в неоднородных магнитных полях в стационарных и динамических режимах, изменение модуля упругости в однородных магнитных полях, магнитострикция и эффект памяти формы, анизотропия упругости МЭК, синтезированного в магнитном поле. В заключение рассмотрено применение МЭК в качестве активного демпфирующего устройства.

**Магнитоэластичный композит** получают диспергированием магнитного порошка в жидком силиконовом каучуке с последующей полимеризацией композиции в форме. В качестве магнитных наполнителей используют порошки магнетита и железа (размер частиц 0,5 мкм и 2...5 мкм соответственно).

Для улучшения совместимости с органическим связующим порошки модифицируют поверхностно-активными веществами (ПАВ) и кремнийорганическими соединениями. В качестве модификаторов используют фосфорорганическое ПАВ КД-6, силиконовое масло ПМС-100 и гидридсодержащий силикон ГКЖ-94. Процесс модифицирования состоит в нанесении на поверхность порошка модификатора (1...2% (масс.)) из раствора легко кипящего растворителя — петролейного эфира. Подготовленный таким способом порошок растирают с жидким силиконовым каучуком марки СИЭЛ (производство ГНИИХТЭОС). Композит отверждается при температуре 150 °С в течение 1–2 ч. Часть образцов получают, используя магнитное поле 400 Э, которое прикладывают к форме с полимеризующейся массой.

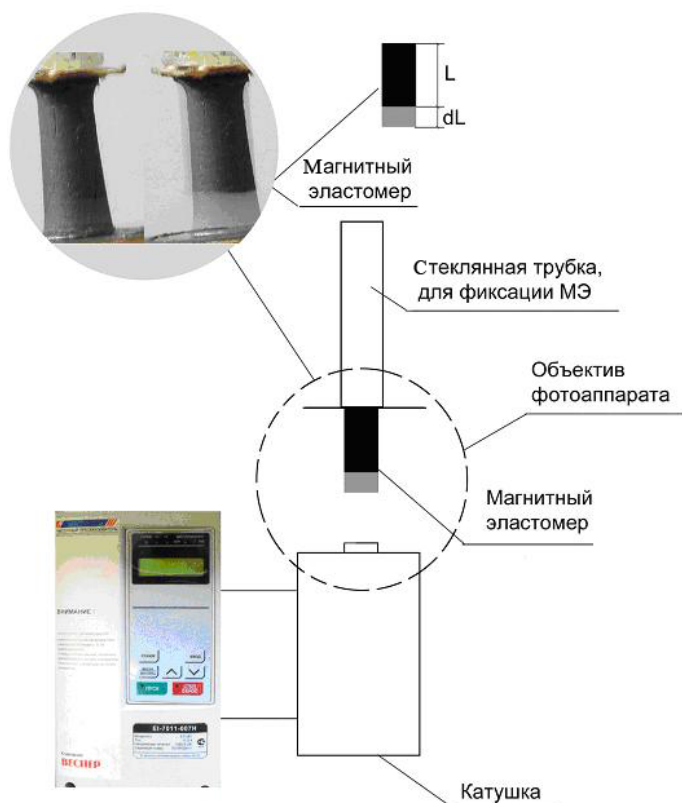
Из полимеризованных пластин МЭК толщиной 3...5 мм вырезали образцы (3×3×20 мм) для последующих исследований. Упругость образцов измеряли по стандартной методике при их растяжении и снятии характеристической кривой “деформация–напряжение” в образце; магнитные свойства определяли с помощью ВН-метра, мод. 7000А.

Модуль Юнга рассчитывали согласно закону Гука как отношение изменения напряжения к изменению деформации на линейном участке кривой  $\sigma = f(L)$ :  $E = \Delta\sigma/\Delta L$ , где  $\Delta\sigma$  — изменение напряжения в образце;  $\Delta L$  — изменение относительной деформации.

Упругие свойства МЭК измеряли также и в магнитном поле 340 мТл, которое прикладывали как вдоль направления деформации образца, так и в поперечном направлении.

**Основные свойства МЭК. Магнитодеформационный эффект.** Магнитоэластичный композит создавался как магнитоуправляемый материал, способный реагировать на магнитное поле. Поэтому, в первую очередь, было исследовано его свойство удлиняться в неоднородном магнитном поле.

Цилиндрический образец МЭК подвешивали над полюсом электромагнита (рис. 1) и измеряли удлинение в зависимости от напряженности магнитного поля на поверхности электромагнита. В эксперименте исследовали образец МЭК на основе силиконового каучука и магнетита с размером частиц 0,2... 0,3 мкм и концентрацией 50% (мас.).

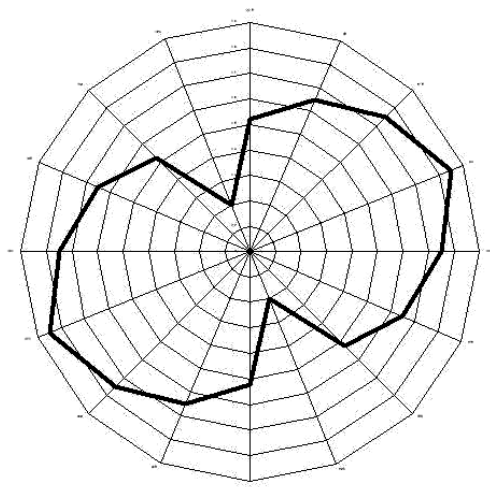


**Рис. 1. Схема измерения магнитодеформационного эффекта в постоянном и переменном неоднородных магнитных полях**

Образец был получен в магнитном поле и является анизотропным.

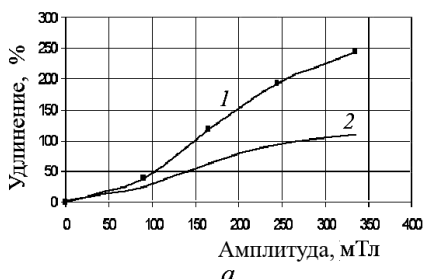
### **Анизотропия упругости.**

Анизотропия в образце возникает из-за разной упругости материала в зависимости от направления его деформации. Если во время полимеризации образца направление растяжения образца совпадает с направлением магнитного поля, то образец проявляет наибольшую упругость, если эти направления взаимно перпендикулярны, то упругость минимальна. Это хорошо видно на диаграмме (рис. 2), на которой круговой образец равномерно, с одинаковой силой растягивается во всех направлениях. В случае, если направление растягивающей силы совпадает с направлением магнитного поля, образец имеет максимальную упругость. Для образца, наполненного игольчатым порошком оксида  $\gamma$ -железа в количестве 50 % (мас.), модуль Юнга различается при измерении его в перпендикулярных направлениях [6].



**Рис. 2. Диаграмма деформирования анизотропного образца магнитоэластика (образец растянут силой 20 кПа)**

Деформация МЭК (анизотропного) на основе магнетита с модулем Юнга 3 кПа в постоянных и переменных магнитных полях приведена на рис. 3. Как видно из рисунка, деформация прямо пропорциональна напряженности магнитного поля (градиенту магнитного поля) и обратно пропорциональна модулю упругости. Амплитуда деформации уменьшается с увеличением частоты магнитного поля соленоида.



**Рис. 3. Зависимость удлинения анизотропного МЭК от амплитуды (а) и частоты (б) магнитного поля для двух направлений ориентации образца:**

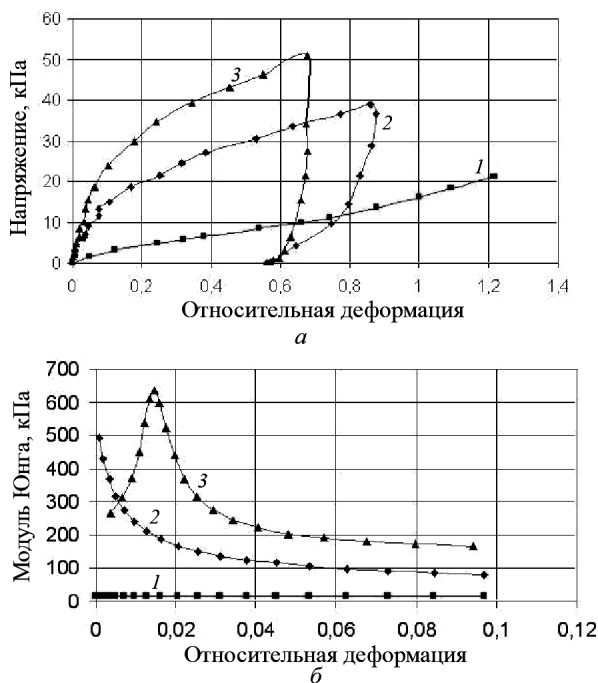
1 и 2 — перпендикулярная и параллельная ориентация (а), 1, 2, 3 и 4 — 85; 100; 150 и 170 мТл соответственно (б)

В целом можно сказать, что данный тип материала является низкочастотным. Для более жестких образцов с небольшой деформацией рабочие частотные характеристики могут быть расширены до 500 Гц.

**Магнитореологический эффект.** Наибольший интерес при исследовании МЭК (примерно 80 % публикаций) представляет эффект изменения упругости в магнитном поле. Так, многие исследователи отмечали, что магнитореологическим материалом может называться только тот материал, который синтезирован в магнитном поле. Такие материалы достаточно сильно меняют упругость в магнитном поле при условии совпадения направления магнитных полей во время получения и испытаний образцов. В случае изотропного образца или если направления поля и ориентации магнитных частиц в образце перпендикулярны, эффект практически не проявляется [7–13]. По-видимому, это связано с увеличением локальной концентрации магнитных частиц, которые образуют цепи в магнитном поле при полимеризации композита, и этот эффект высокой концентрации проявляется в случае, когда направления магнитного поля и цепей совпадают. Получены значительные магнитореологические эффекты на изотропных образцах, что связано, вероятно, со значительными концентрациями наполнителя в образцах (до 35 % (об.) против 28 % (об.)). Исследования зависимости упругости от концентрации магнитных частиц для обычного изотропного материала показывают, что упругость в магнитном поле возрастает, как правило, тем больше, чем больше концентрация магнитного наполнителя.

Упругость образца исследовали методом растяжения его в магнитном поле вдоль и поперек направления этого магнитного поля. Исследовали образец МЭК с объемной концентрацией магнитного порошка карбонильного железа 35 % и модулем Юнга 16 кПа. Данный образец характеризуется практически предельным наполнением, при котором сохраняется достаточная эластичность материала. Последние исследования показали, что при общем эффекте нарастания упругости с увеличением напряженности магнитного поля и концентрации магнитного наполнителя наблюдается эффект максимального повышения упругости в области малых деформаций образца. На рис. 4, а приведены первичные зависимости напряжения в образце магнитоэластика от его растяжения в магнитном поле и при его отсутствии.

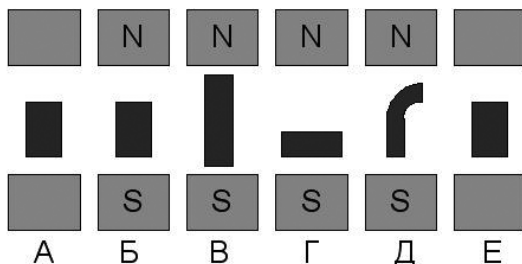
Как видно из рис. 4, а, при одной и той же деформации напряжение магнитного поля в образце нарастает значительно быстрее в области малых деформаций (0...5 %), чем в области более высоких деформаций. Дифференциальный модуль Юнга в зависимости от деформации представлен на рис. 4, б. Как видно из рисунка, исходный модуль Юнга образца, равный 16 кПа, в магнитном поле при малых деформациях возрастает до 500...600 кПа, т.е. более чем в 30 раз. Аналогичные



**Рис. 4.** Зависимость напряжения в образце (*a*) и модуля Юнга (*b*) от относительной деформации МЭК в магнитных полях:  
 1, 2 и 3 — 0; 120 и 260 мТл соответственно

результаты были получены при измерении напряжения сдвига в магнитном поле.

**Эффект памяти формы в магнитном поле.** Было замечено, что образец, помещенный в однородное магнитное поле, практически не деформируется, но если к образцу приложить внешнее механическое воздействие и деформировать его, то он приобретает новую форму и сохраняет ее, т.е. остается растянутым, сжатым, скрученным, изогнутым, сплюсненным и т.д. Качественно эффект памяти формы иллюстрирован на рис. 5. Образец МЭК располагался между полюсами электромагнита (А). После включения магнитного поля практически не наблюдалось никакой деформации образца (Б), но если образец внешним воздействием растянуть (В), сжать (Г), изогнуть (Д), то обра-

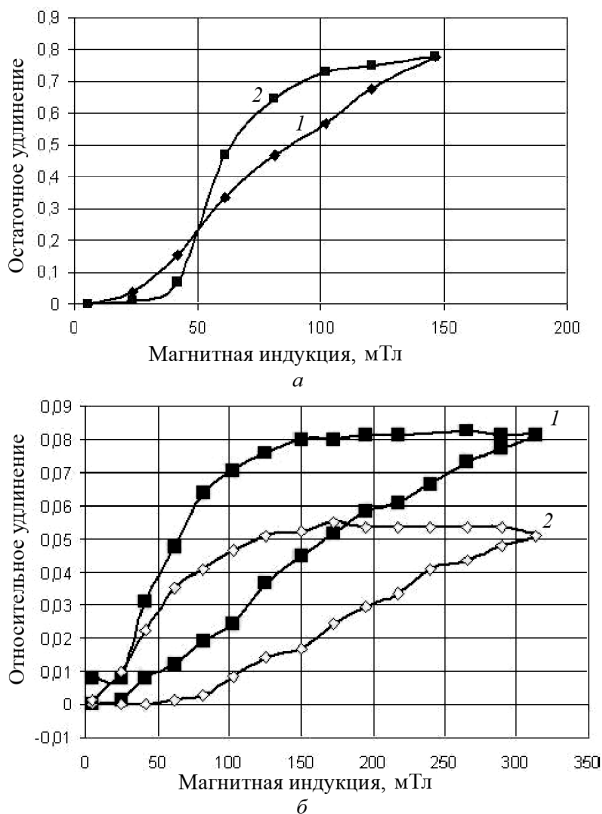


**Рис. 5.** Варианты деформации МЭК в однородном магнитном поле

зец сохраняет эту новую форму до тех пор, пока находится в однородном магнитном поле. После выключения магнитного поля образец восстанавливает исходную форму (Е).

Можно заметить, что с данным эффектом мы уже столкнулись ранее (см. рис. 4, а). Если прямые 1 нагрузки и разгрузки образца без магнитного поля совпадают, то при разгрузке образца в магнитном поле (кривые 2,3) наблюдается остаточная деформация в размере  $\approx 60\%$ . При этом остаточная деформация тем больше, чем сильнее магнитное поле и ниже упругость МЭК.

Рассмотрим зависимость остаточной деформации от растяжения образца в магнитном поле и зависимость восстановления исходной формы от магнитного поля (рис. 6, а). Первый параметр — остаточная деформация образца при его растяжении в магнитном поле. Образец растягивали до деформации 100% и более в магнитном поле, снимали внешнюю нагрузку и регистрировали остаточную деформацию. Как видно на рис. 6, а, для образца НТ-75 ( $E = 16$  кПа) остаточное удлинение при 150 мТл (кривая 1) составляет 80%, т.е. длина образца в 1,8 раза больше исходной длины. Вторая зависимость показывает, как при



**Рис. 6. Зависимость удлинения образцов от магнитного поля:**

а — остаточное удлинение при усилении (1) и ослаблении (2) поля; б — относительное удлинение изотропного (1) и анизотропного (2) образцов

уменьшении индукции магнитного поля восстанавливается исходный размер по характерной кривой 2. Данная кривая воспроизводится при уменьшении магнитного поля с любого начального значения. Таким образом, получены качественные и количественные характеристики эффекта памяти формы.

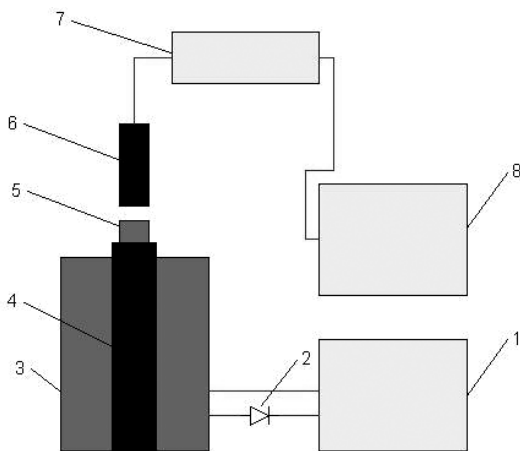
**Магнитострикция.** Вопрос об удлинении МЭК в однородном магнитном поле одно время был дискуссионным. Цилиндрический образец удлинялся в магнитном поле, но незначительно, не более чем на 10 %, что являлось очень малой величиной по сравнению с деформациями в неоднородном магнитном поле, составляющими 100...200 %, поэтому на эти деформации не обращали внимание. Области малых деформаций в однородном магнитном поле были подвергнуты тщательному изучению после теоретической работы Райхера–Столбова [18], в которой была рассчитана величина магнитострикционного эффекта цилиндрического образца, помещенного в однородное магнитное поле.

Были изучены зависимости для ряда образцов при усилении и ослаблении магнитного поля. Образцы содержали 35 % (об.) карбонильного железа, причем один из них был анизотропным (полимеризация образца проведена в магнитном поле). На рис. 6, б приведены зависимости относительного удлинения двух образцов — изотропного с  $E = 42$  кПа и анизотропного с  $E = 52$  кПа.

Деформационная кривая каждого образца характеризуется значительным гистерезисом. Для анизотропного образца магнитное поле его ориентации при изготовлении совпадает с направлением поля деформации. Как видно, магнитострикционный эффект достигает 8 % (кривая 2). Механизм деформации образцов объясняется обратимым перемещением магнитных частиц внутри полимерной матрицы. Для анизотропного образца (второго образца) эффект меньше, поскольку частицы в образце уже в большей степени выстроены в цепи и их перемещение ограничено. Значительный гистерезис при уменьшении магнитного поля объясняется квадратичной зависимостью силы притяжения намагниченных частиц в магнитном поле. Таким образом, относительно новый МЭК обладает большой совокупностью новых интересных свойств.

**Деформация сжатия МЭК в неоднородном и переменном магнитных полях.** Проведено исследование зависимости степени сжатия МЭК от напряженности неоднородного магнитного поля. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 7. Цилиндрический образец 5 (высотой 5 мм) расположен на поверхности электромагнита 4, который работает от частотного регулятора напряжения 1, через диод 2 создающего пульсирующее напряжение. Деформация сжатия измеряется датчиком расстояния 6. Через аналогово-цифровой преобразователь 7 сигнал подается на компьютер и обрабатывается.





**Рис. 7. Схема измерения деформационных свойств МЭК:**

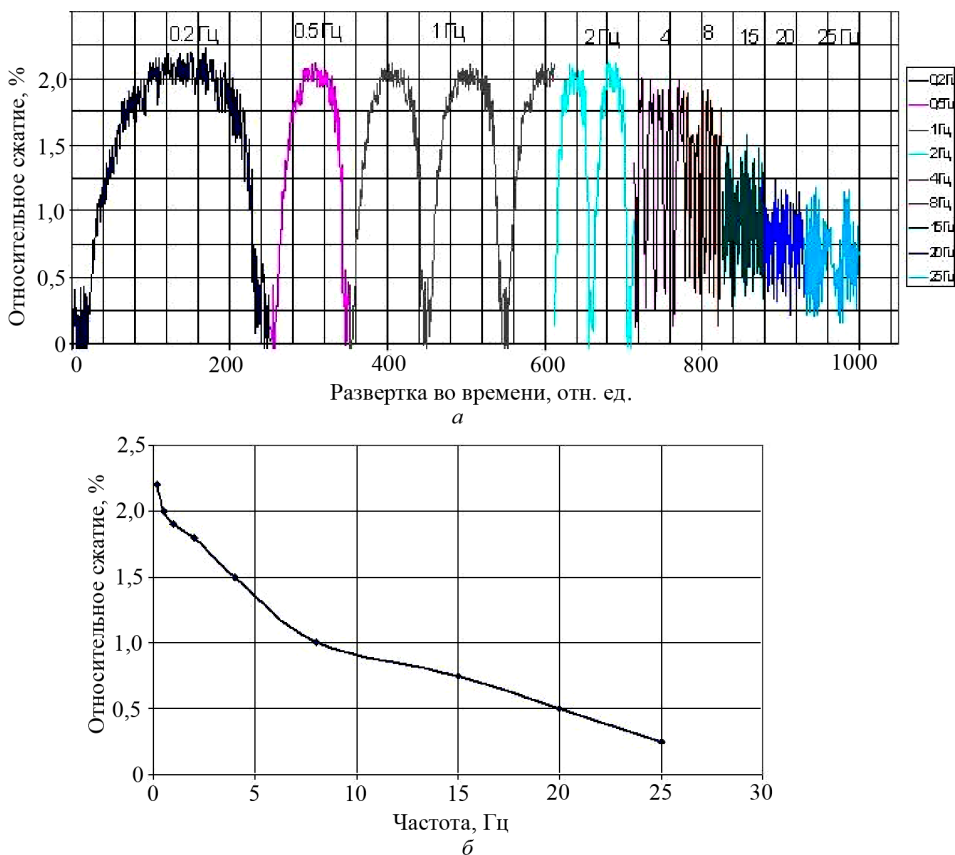
1 и 7 — амплитудно-частотный и аналогово-цифровой преобразователи; 2 — диод; 3 и 4 — катушка и сердечник электромагнита; 5 — образец МЭК; 6 — датчик расстояния; 8 — компьютер

Характеристика сигнала сжатия МЭК при разных частотах приведена на рис. 8, а. Как видно из рисунка, амплитуда сжатия с увеличением частоты снижается. Это связано как с частотной характеристикой самого магнитоэластика, так и с некоторым снижением тока и соответственно магнитного поля в катушке электромагнита.

Зависимость амплитуды сжатия магнитоэластика от частоты магнитного поля приведена на рис. 8, б.

**Демпфирующее устройство на основе магнитоэластичного композита.** В современном прецизионном оборудовании, в частности для микролитографии, анализа поверхности, производства шаблонов печатных плат и юстировки лазеров, используются системы виброзащиты от внешних воздействий для реализации точного позиционирования инструмента. Проблему виброзащиты можно решить, основываясь на принципиально новых демпферах, выполненных на основе МЭК. В ГНИИХТЭОС и МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан и исследован экспериментальный образец магнитоэластичного демпфера (МЭ-демпера), имеющего малую погрешность линейного перемещения ( $\leq 1$  мкм), малую постоянную времени ( $\leq 0,5$  с), диапазон линейных перемещений более 20 мкм и передаваемую силу более 10 Н.

**Управление вязкопластично-упругими свойствами магнитоэластика.** Для виброзащиты прецизионного оборудования применяются, как правило, активные системы подавления внешних воздействий. Такие устройства представляют собой электромеханические системы с отрицательной обратной связью, которая обеспечивает стабильное положение виброизолирующей платформы в пространстве (рис. 9, а).

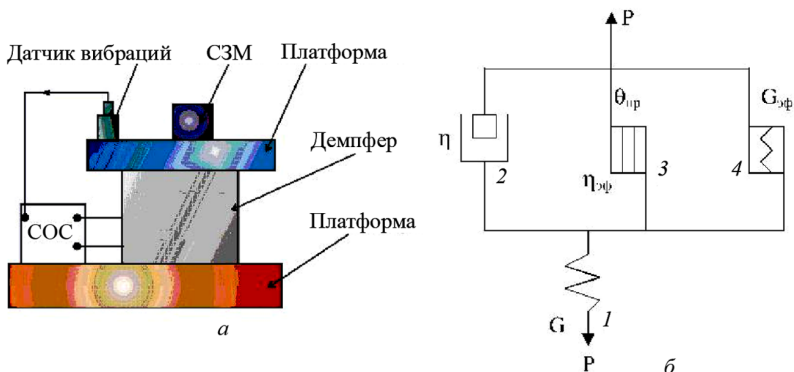


**Рис. 8. Зависимость относительного сжатия (а) и амплитуды сжатия (б) магнитоэластика от частоты переменного магнитного поля**

Принцип работы активных систем заключается в следующем. На платформе располагается датчик вибраций — акселерометр, реагирующий на ускорение платформы. Сигнал с датчика поступает в систему обратной связи (СОС), где усиливается и в противофазе подается на МЭ-демпфер, который, смещаясь в противоположную сторону, гасит ускорение платформы.

Анализ реологических процессов в МЭ-демпфере проводился на основе механических моделей поведения реологических сред [22]. МЭК — это твердотельные аналоги магнито-реологических суспензий, их можно использовать в системах микро- и нанопозиционирования [23]. Модельный метод изучения реологических процессов в демпфере основан на том, что, комбинируя вязкий, пластичный и упругий элементы, законы деформации которых известны, получают модель, воспроизводящую с определенной степенью точности поведение реологических сред.

Общее представление о поведении магнитоэластика дает модель, изображенная на рис. 9, б. В условиях воздействия сдвиговых и магнитных полей реологические среды ведут себя, как вязкопластично-



**Рис. 9.** Общая схема демпфирования (а) и механическая модель поведения реологической среды (б)

упругие тела. Пружина  $1$  сообщает веществу свойства идеально упругого тела с модулем упругой деформации  $G$ , пара цилиндр–поршень  $2$  — свойства ньютоновской жидкости с вязкостью  $\eta$ , а ползунок  $3$  — свойства пластично-текучего тела.

До преодоления сил статического трения на поверхности ползунок модель деформируется упруго. После преодоления сил статического трения вещество начинает течь как вязкая жидкость. Ползунок  $3$  с пружиной  $4$  сообщает телу способность упруго деформироваться после преодоления сил статического трения в ползунке  $3$ .

Реологическая среда, соответствующая описанной модели, характеризуется тремя параметрами: эффективным модулем сдвига  $G_{эф}$ , коэффициентом эффективной вязкости  $\eta_{эф}$  и пределом прочности на сдвиг  $\theta_{пр}$ . При малых сдвиговых скоростях, характерных для реологического модуля,  $\theta_{пр}$  должен быть заменен на предел текучести  $\tau_0$ , а  $\eta_{эф}$  — на динамическую эквивалентную вязкость  $\mu_{эkv}(H)$ , зависящую от напряженности магнитного поля.

Последовательное соединение элементов  $1$  и  $2$  (см. рис. 9, б) представляет собой модель Максвелла. В зависимости от скорости нагружения эта модель сочетает в себе упругие и вязкие свойства реологической среды. При быстром нагружении она оказывается малодеформируемой и стремится упруго восстановить свою форму, подчиняясь закону Гука. При медленном нагружении эта модель течет, причем скорость деформации прямо пропорциональна приложенному напряжению  $\sigma$  (закон Ньютона).

Поведение модели Максвелла может быть описано дифференциальным уравнением

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительная деформация модели;  $\sigma$  — напряжение, возникающее в реологической среде;  $E$  — модуль упругости пружины;  $\eta$  — вязкость ньютоновской жидкости, заполняющей демпфер.

В случае постоянной деформации модели ( $\varepsilon = \text{const}$ ,  $d\varepsilon/dt = 0$ ) происходит процесс релаксации напряжений. Уравнение (1) можно переписать в виде

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt. \quad (2)$$

После интегрирования уравнения (2) от 0 до  $t$  и от  $\sigma_0$  до  $\sigma$  получим следующее уравнение:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta} t}. \quad (3)$$

Если ввести обозначение

$$\tau = \eta/E, \quad (4)$$

где  $\tau$  — время релаксации напряжения в реологической среде, то получим окончательно

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что  $\sigma \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , т.е. напряжения в модели полностью исчезают. При  $t \ll \tau$  величина  $t/\tau \rightarrow 0$ , тогда  $\sigma \rightarrow \sigma_0$ , т.е. релаксация не успевает произойти и начальное напряжение сохраняется в течение всего опыта.

Вторым примером использования уравнения (1) является случай возникновения постоянных напряжений в модели ( $\sigma = \text{const}$ ,  $d\sigma/dt = 0$ ). При этом модель течет и описывается законом Ньютона

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (6)$$

Модель Максвелла не учитывает наличия в реологических средах упругости, отличной от гуковской упругости, т.е. возникающей из-за развертывания цепочек частиц дисперсной фазы под действием магнитных полей. Основной особенностью этого вида упругости является необходимость определенного промежутка времени для ее развития. Создается впечатление, что деформируется пружина, находящаяся в вязкой среде. Такое представление аналогично развертыванию цепочек или “мостиков” частиц, находящихся в вязкой среде. Такая “запаздывающая” упругая реакция может быть представлена моделью Кельвина–Фогта.

Модель представляет собой параллельное соединение упругого (4) и вязкого (2) элементов (см. рис. 8, б). Дифференциальное уравнение, описывающее процесс деформации модели Кельвина–Фогта, имеет вид

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (7)$$

Интегрируя это уравнение по времени в пределах от 0 до  $t$ , получаем

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-t/\tau}). \quad (8)$$

Рассмотрим эффект упругого восстановления упруговязкого тела после снятия нагрузки, когда  $\sigma = 0$ :

$$E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = 0. \quad (9)$$

Отсюда может быть определена деформация

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-t/\theta}, \quad (10)$$

где  $\theta = \eta/E$  — время запаздывания.

Элемент 3 — ползунок в механической модели упругопластично-вязкого тела (см. рис. 9, б) — характеризуется наличием сил статического трения  $F_{ст}$ . При воздействии на ползунок силы  $F < F_{ст}$  он остается неподвижным и начинает движение только при  $F \geq F_{ст}$ .

**Описание МЭ-демпфера.** МЭ-демпфер (рис. 10, а) содержит ограничивающие втулки 1, 2, втулки из магнитоэластика 3, 4, опору 5, перемещаемую платформу 6 из стали 20, сердечник 7, фиксирующее кольцо 8, винт 9, регулировочные винты 10, электромагнитную катушку 11 и пружины 12. Кроме того, МЭ-демпфер оснащен датчиком перемещения и системой управления.

На электромагнитную катушку 11 с блока питания подается управляющий сигнал, вследствие чего возникает замкнутое магнитное поле, проходящее через магнитоэластик. Замкнутая магнитная цепь образуется следующими элементами: сердечник 7 — цилиндрический магнитоэластик 4 — платформа 6 — трубчатый магнитоэластик 3 — опора 5 — сердечник 7. При действии магнитного поля на магнитоэластик магнитные частицы выстраиваются вдоль поля, изменяя геометрические размеры образца и его модуль Юнга. При этом платформа 6 перемещается по вертикальной оси.

Сигнал от емкостного датчика перемещения платформы 6 поступает через АЦП в компьютер, сохраняется и отображается на экране

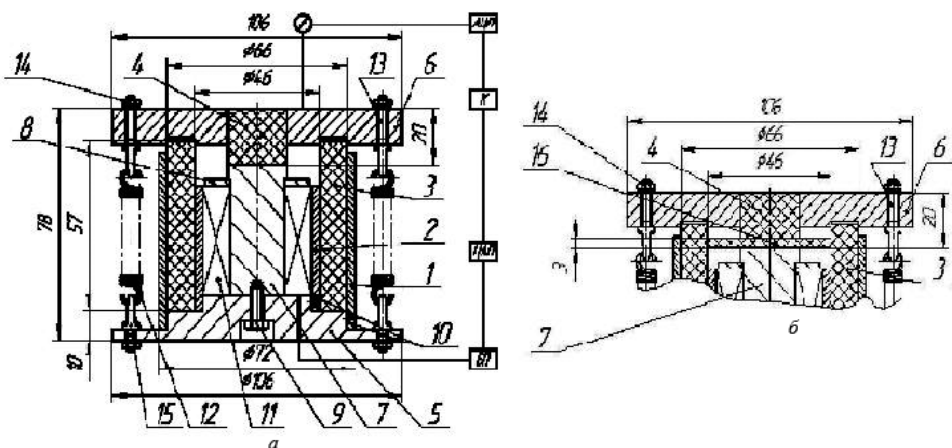


Рис. 10. Схема МЭ-демпфера со стальной (а) и дюралюминиевой (б) платформами

монитора. Перемещение платформы *б* можно регулировать по заданному закону при помощи замкнутой системы управления.

Чтобы исключить влияние на жесткость демпфера намагниченной платформы *б* из стали 20, был использован немагнитный материал — сплав Д16 (дюралюминий). Для эксперимента была доработана конструкция демпфера (рис. 10, *б*). Изготовлено кольцо *1б* из магнитоэластика для замыкания магнитнопровода: сердечник 7 — магнитоэластичное кольцо *1б* — цилиндрический магнитоэластик 3 — опора 5 — сердечник 7.

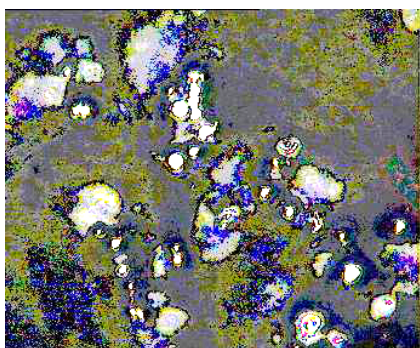


Рис. 11. Фотография магнитоэластика ( $\times 1600$ )

Фотография магнитоэластика, полученная при помощи металлографического микроскопа с увеличением 1600, приведена на рис. 11. В прозрачном силиконовом каучуке видны сферические частицы карбонильного железа размером 1...10 мкм, структурированные под действием поля в цепочки.

**Точность и быстродействие МЭ-демпфера.** Погрешность позиционирования  $\delta_c$  МЭ-демпфера с замкнутой системой управления как функция сил статического трения может быть определена следующим образом:  $\delta_c = F_{ст}k$ , где  $F_{ст}$  — сила статического трения в демпфере;  $k$  — коэффициент передачи системы управления демпфера по силам статического трения. При этом сила статического трения  $F_{ст}$  определяется пределом прочности магнитоэластика на сдвиг  $\theta_{пр}$ .

Быстродействие демпфера зависит от времени переходных процессов в магнитоэластике. Время структурирования реологической среды  $t_{стр}$  и релаксации  $t_r$  сдвиговых напряжений, как уже было сказано, определяется отношением  $\mu_{эКВ}(H)/E$ , где  $\mu_{эКВ}(H)$  — динамическая эквивалентная вязкость реологической среды;  $E$  — модуль упругости этой среды. Эти параметры, а также значения времени могут регулироваться при изменении уровня напряженности магнитного поля силой тока в катушке.

В ходе эксперимента была получена временная зависимость перемещения платформы демпфера из стали 20 при нагрузке 16 Н и силе тока 2 А (рис. 12). По этой зависимости

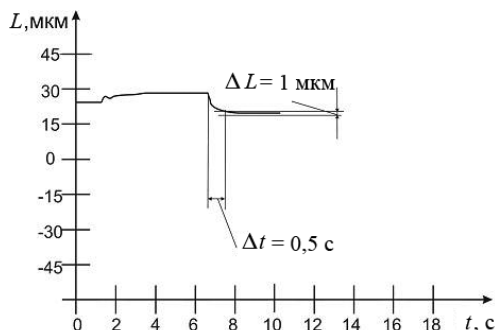


Рис. 12. Временная зависимость перемещения платформы демпфера при нагрузке 16 Н и силе тока 2 А

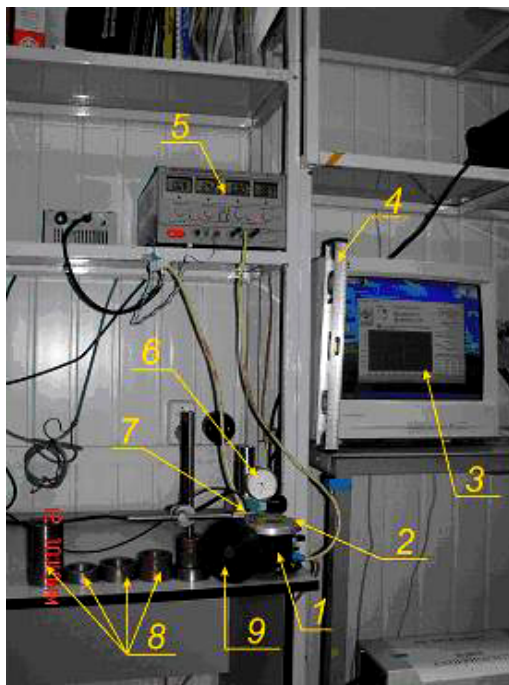
легко определить время  $\Delta t$  переходного процесса в МЭ-демпфере, которое представляет собой время релаксации сдвиговых напряжений. Можно также найти и погрешность позиционирования демпфера  $\Delta L$  (погрешность линейных перемещений).

**Исследование жесткости МЭ-демпфера.** Общий вид установки для исследования упругих характеристик МЭ-демпфера приведен на рис. 13. По результатам экспериментов построены графики жесткостных характеристик демпфера со стальной платформой (рис. 14, а). Из графика видно, что при увеличении силы тока, подаваемого на катушку, жесткость демпфера увеличивается, при этом зависимость относительного перемещения платформы имеет практически линейный характер.

Экспериментальные графики жесткостных характеристик демпфера с дюралюминиевой платформой приведены на рис. 14, б. Из графиков видно, что при увеличении силы тока, подаваемого на катушку, жесткость демпфера увеличивается. Зависимость относительного перемещения имеет нелинейный характер на участке от 0 до 8 Н, что объясняется выборкой микролюфтов в магнитоэластике. На участке от

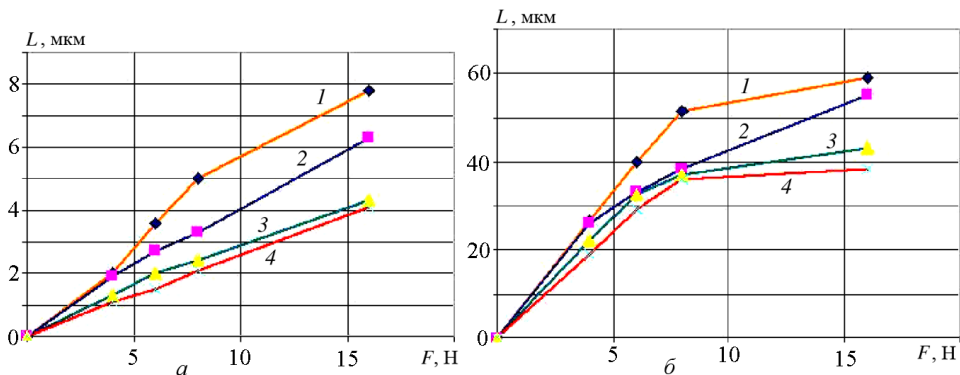
8 до 16 Н жесткостная характеристика принимает линейный характер. Перемещение платформы из сплава Д16 в несколько раз больше, чем у платформы из стали 20. Это говорит о том, что жесткость демпфера со стальной платформой в несколько раз больше жесткости демпфера с дюралюминиевой платформой.

**Исследование времени переходного процесса МЭ-демпфера.** Из графика на рис. 15 видно, что время переходного процесса в МЭ-демпфере имеет нелинейную зависимость от нагрузки при постоянном токе 2 А. Время переходного процесса тем меньше, чем больше нагрузка на демпфер. При этом время переходного процесса в опытах с платформой из стали 20 больше, чем в опытах с платформой



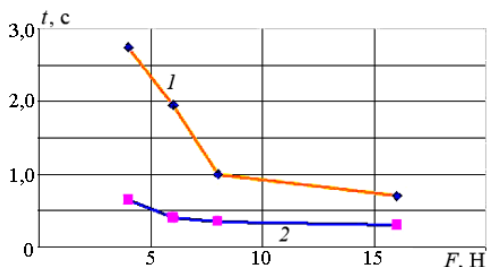
**Рис. 13. Общий вид установки для исследования характеристик МЭ-демпфера:**

1 — МЭ-демпфер; 2 — платформа (Д16); 3 — дисплей; 4 — уровень; 5 — блок питания; 6 — микрометрический индикатор; 7 — емкостный датчик; 8 — грузы весом 2, 2, 4, 16 Н; 9 — платформа (сталь 20)



**Рис. 14. График жесткостной характеристики демпфера со стальной (а) и дюралюминиевой (б) платформами:**

1, 2, 3 и 4 — ток 0,5; 1; 1,5 и 2 А



**Рис. 15. Графики зависимости времени переходного процесса от нагрузки при перемещении платформы демпфера:**

1 — сталь 20; 2 — Д16

из сплава Д16, так как с течением времени наблюдается увеличение намагниченности стальной платформы.

**Выводы.** 1. Разработаны условия синтеза силиконового МЭК, обладающего уникальными свойствами: увеличение в 100 раз упругости в магнитном поле 0,35 Тл, на 250 % растяжения в неоднородном магнитном поле; проявление эффекта магнитострикции в однородном магнитном поле (до 10 %), проявление памяти формы в магнитном поле. Этот комплекс свойств может быть использован при конструировании новых устройств в различных областях техники.

2. На основе МЭК, который может быстро (менее 0,5 с) и обратимо структурироваться (менять модуль Юнга и относительную деформацию) при воздействии управляющих сигналов, разработана система виброзащиты, сочетающая субмикронную точность и высокое быстродействие.

3. Разработана модель процессов структурирования и релаксации МЭК, позволяющая выбирать и рассчитывать параметры автоматизированного управления МЭ-демпфером с заданными требованиями.

*Работа выполнена при частичной поддержке Гранта РФФИ 06-01-00723 и Государственного контракта с Федеральным агентством по науке и инновациям № 02.442.11.7254.*



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левина Е. Ф. и др. Патент РФ № 2157013, 2000.
2. Nikitin L., Kornev K., Mironova L., Stepanov G., A Samus proc. moscow int. sympos. on magnetism, Moscow, 1999, Vol. 2, p. 231.
3. Nikitin L. V, et al. // J. Polymer Science, Ser. A. 2001. Vol. 43. No. 4, p. 443–450.
4. Nikitin L. V et al. // J. Polymer Science, Ser. A. 2004. Vol. 46. No. 3, p. 498–509.
5. Nikitin L. V., Stepanov G. V., Mironova L. S. // JMMM, 272–276 (2004), p. 2072–2073.
6. Степанов Г. В., Горбунов А. И. // Хим. пром. сегодня. – 2005. – № 9. – С. 25–32.
7. Ginder M., Nichols M., Elie L.D., Stewart W. Patent US5816587 (1998).
8. Ginder J. M., et al., J. Intell. Mater. Sys. Struct. 1996, 7, p. 613.
9. Jolly M. R, Carlson J. D., Munoz B. C. J. Intell. Mater. Sys. Struct. 1996, 7, p. 613.
10. Shen Y., Golnaraghi M. F. // J. Intell. Mater. Sys. Struct. Vol. 15, (2004), 27–35.
11. Bossis G., et al. // Int. J. Mod. Phys. B, 15, (2001), 564.
12. Bellan C., Bossis G. // Int. J. Modern Physics B, Vol. 16, No 17 & 18 (2002), 2447–2453.
13. Zhou G. Y., Yang Z. Y. // Smart Mater. Struct. 13 (2004). 309–316.
14. Zrinyi M., Gacs J., Simon C. Patent WO 9702580.
15. Szabo D., Szeghy G., Zrinyi M. // Macromolecules. – 1998, 31, 6541–6548.
16. Lanotte L. et al. // Phys. Rev. B63, 054438 (2001).
17. Lanotte L. et al. // ICM 2003, Rome, Italy. July 27–August 1, 2003, p. 91.
18. Райхер Ю. Л., Столбов О. В. // Прикл. мех. техн. физ. – 2005. – № 3. – С. 153.
19. Столбов О. В., Райхер Ю. Л., Степанов Г. В. // Тр. Международн. шк.-симпоз. НМММ-20. 2006, Москва, МГУ. – С. 1065.
20. Farshad M., Le Roux M. Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels // Polymer testing. – 2005. No 24, p. 163–168.
21. Алексеев А. Ф., Корнев А. Е. Магнитные эластомеры. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
22. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров: Учеб. для хим.-технол. вузов. – М.: Лабиринт, 1994. – 367 с.
23. Механика и физика точных вакуумных механизмов: В 2 т. Т. 2 / А.Т.Александрова, Н.С.Вагин, Н.В.Василенко и др.; Под ред. Е.А.Деулина. – М.: НПК “Интелвак”; Вакууммаш, 2002. – 152 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2006

Анатолий Иванович Горбунов родился в 1930 г., окончил МХТИ им. Д.И. Менделеева в 1956 г. Д-р. хим. наук, профессор кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 60 научных работ.

A.I. Gorbunov (b. 1930) graduated from the Moscow Chemical and Technological Institute n. a. D.I. Mendeleev in 1956. D. Sc. (Chem.), professor of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 60 publications.

Валерий Павлович Михайлов родился в 1961 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. Д-р. техн. наук, профессор кафедры МТ-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ.

V.P. Mikhailov (b. 1961) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. D. Sc. (Eng.), professor of "Ballistics and Aerodynamics" department of the Bauman Moscow State Technical University.

Геннадий Владимирович Степанов родился в 1959 г., окончил МХТИ им. Д.И. Менделеева в 1983 г. Начальник сектора ГНИИХТЭОС, автор 60 научных работ.

G.V. Stepanov (b. 1959) graduated from the Moscow Chemical and Technological Institute n.a. D.I. Mendeleev in 1983. Head of sector of "GNIKKhTEOS". Author of 60 publications.

Дмитрий Юрьевич Борин родился в 1980 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г. Аспирант кафедры МТ-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор пяти научных работ.

D.Yu. Borin (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Post-graduate of "Metal-cutting Machines" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications.

Александр Алексеевич Андриянов родился в 1985 г., студент кафедры МТ-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы.

A.A. Adrianov (b. 1985) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication.

Дмитрий Владимирович Темнов родился в 1985 г. студент кафедры МТ-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы.

D.V. Temnov (b. 1985) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication.

Денис Алексеевич Семеренко родился в 1983 г., окончил МГУПИ в 2006 г. Инженер кафедры ПР-3 МГУПИ. Автор двух научных работ.

D.A. Semerenko (b. 1983) graduated from the "MGUPI" in 2006. Engineer of "PR-3" department of "MGUPI". Author of 1 publication.