

УДК 541.64:537.6:532.135

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УПРУГИЕ И ВЯЗКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОЭЛАСТИКОВ

© 2001 г. Л. В. Никитин*, Л. С. Миронова*, Г. В. Степанов**, А. Н. Самусь*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Физический факультет
119899 Москва, Воробьевы горы

**Государственный научный центр Российской Федерации
“Государственный научно-исследовательский институт химии
и технологии элементоорганических соединений”
111123 Москва, ш. Энтузиастов, 38

Поступила в редакцию 12.07.2000 г.

Принята в печать 23.11.2000 г.

Исследовано влияние однородного магнитного поля на упругие и вязкие свойства новых высокозластичных магнитоуправляемых полимерных материалов – магнитоэластиков, способных существенно деформироваться во внешнем магнитном поле. Обнаружено, что приложение магнитного поля приводит к существенному росту модуля Юнга и коэффициента вязкости этих материалов. Предложена модель, описывающая влияние магнитного поля на упругие характеристики. На основе полученных экспериментальных результатов в рамках предлагаемой теоретической модели рассмотрено влияние внешнего магнитного поля и растягивающей магнитоэластики силы F на объемную долю областей полимера, сжатого взаимодействием магнитных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время композиционные упругие материалы (получившие название магнитных эластомеров или магнитоэластов [1]), главными компонентами которых являются различные полимеры и наполнители с сильно выраженным магнитными свойствами, широко применяются в качестве постоянных магнитов, магнитопроводов,держивающих или скрепляющих элементов, способных повторять неровности и кривизну контактирующих с ними ферромагнитных поверхностей.

Однако работ, посвященных исследованию композиционных полимерных материалов, сколько-нибудь заметно реагирующих на внешнее магнитное поле изменением формы, не так много. Здесь в первую очередь следует указать на работы по изучению магнитных гелей, представляющих собой полимеры с поперечными молекулярными связями, заполненные магнитными частицами с размерами ~10 нм [2–4]. В указанных работах было пока-

зано, что в неоднородном магнитном поле форма магнитного геля зависит от величины и конфигурации поля. При этом были обнаружены вызванные магнитным полем одноосные деформации, достигающие 40% от размера образца в отсутствие поля. Можно также отметить работы по исследованию магнитных гелей на желатиновой основе [5], работы по созданию магнитных полиакриламидных гидрогелей [6], работы по созданию рельефа поверхности магнитного полимерного композита, необходимого для магнитного управления смачиваемостью [7].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния магнитного поля на упругие и вязкие свойства новых высокозластичных магнитоуправляемых полимерных материалов – магнитоэластиков [8–11]. Наблюдаемый в этих материалах гигантский магнитодеформационный эффект, заключающийся в деформации магнитоэластика под действием внешнего магнитного поля, значительно превосходит не только деформации пьезо, электро- и магнитных материалов, но и превышает магнитодеформационные эффекты, обнаруженные в гелях.

E-mail: nikitin@magn.phys.msu.su (Никитин Лев Васильевич).

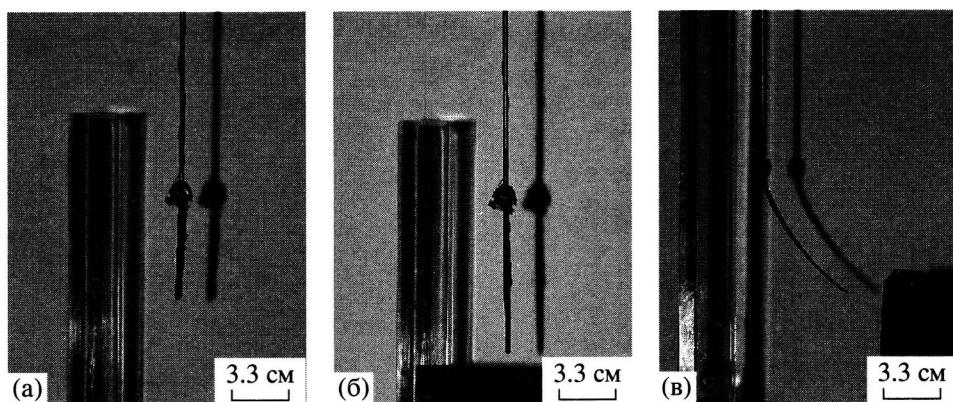
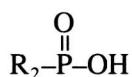


Рис. 1. Фотографии образца из магнитоэластика без поля (а) и в поле постоянного магнита (б), (в).

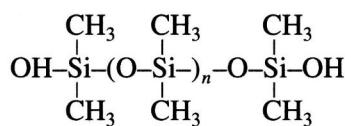
В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены фотографии, на которых изображен образец магнитоэластика.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Магнитоэластики получали путем диспергирования ультрадисперсных и более крупных магнитных частиц в олигомере силоксанового каучука при одновременном присутствии ПАВ и пластификаторов. Для диспергирования и стабилизации дисперсии магнитных порошков в конечном полимере использовали фосфорорганические ПАВ общей формулы



Пластификаторами служили полиметилсилоксаны типа ПМС-100 и ПМС-500. Диспергирование проводили в ультразвуковом диспергаторе УЗДН-А. Основным структуроформирующими полимером в исследуемых материалах являлся силоксановый олигомер, который готовили путем гидролиза диметилдихлорсилана с образованием олигомеров общей формулы



с молекулярной массой 10^4 – 10^5 .

Сетчатую матричную структуру формировали при взаимодействии данных олигомеров с тетраэтилсиланом в присутствии катализатора – бутилкаприлата олова. В результате получили образцы, имеющие высокую эластичность и сравнительно высокое объемное наполнение полимера магнитными частицами.

Увеличение эластичности достигалось введением пластификатора и выбором условий полимеризации магнитоэластика. В некотором смысле магнитоэластики являются твердотельными аналогами магнитореологических жидкостей [12], в которых наблюдается магнитореологический эффект – резкое изменение механических свойств (вязкости, пластичности, упругости) некоторых суспензий под действием магнитного поля. На рис. 2 приведена зависимость величины модуля Юнга для магнитоэластиков, имеющих близкое массовое содержание частиц железа (~30%) с размером ~2 мкм, от массового содержания пластификатора в составе полимерной матрицы, характеризуемого коэффициентом $\nu = m_{\text{пл}}/(m_{\text{пл}} + m_{\text{пол}})$, где $m_{\text{пл}}$ – масса пластификатора и $m_{\text{пол}}$ – масса полимера. Из рисунка следует, что с увеличением в полимерной композиции доли пластификатора модуль Юнга магнитоэластиков убывает. При этом для одного и того же значения ν увеличение мас-

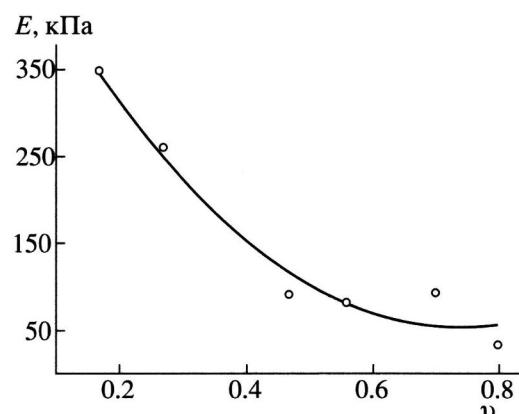


Рис. 2. Зависимость модуля Юнга E от массового содержания пластификатора ν в составе полимерной матрицы для магнитоэластиков с массовым содержанием железных частиц размером 2 мкм около 30%.

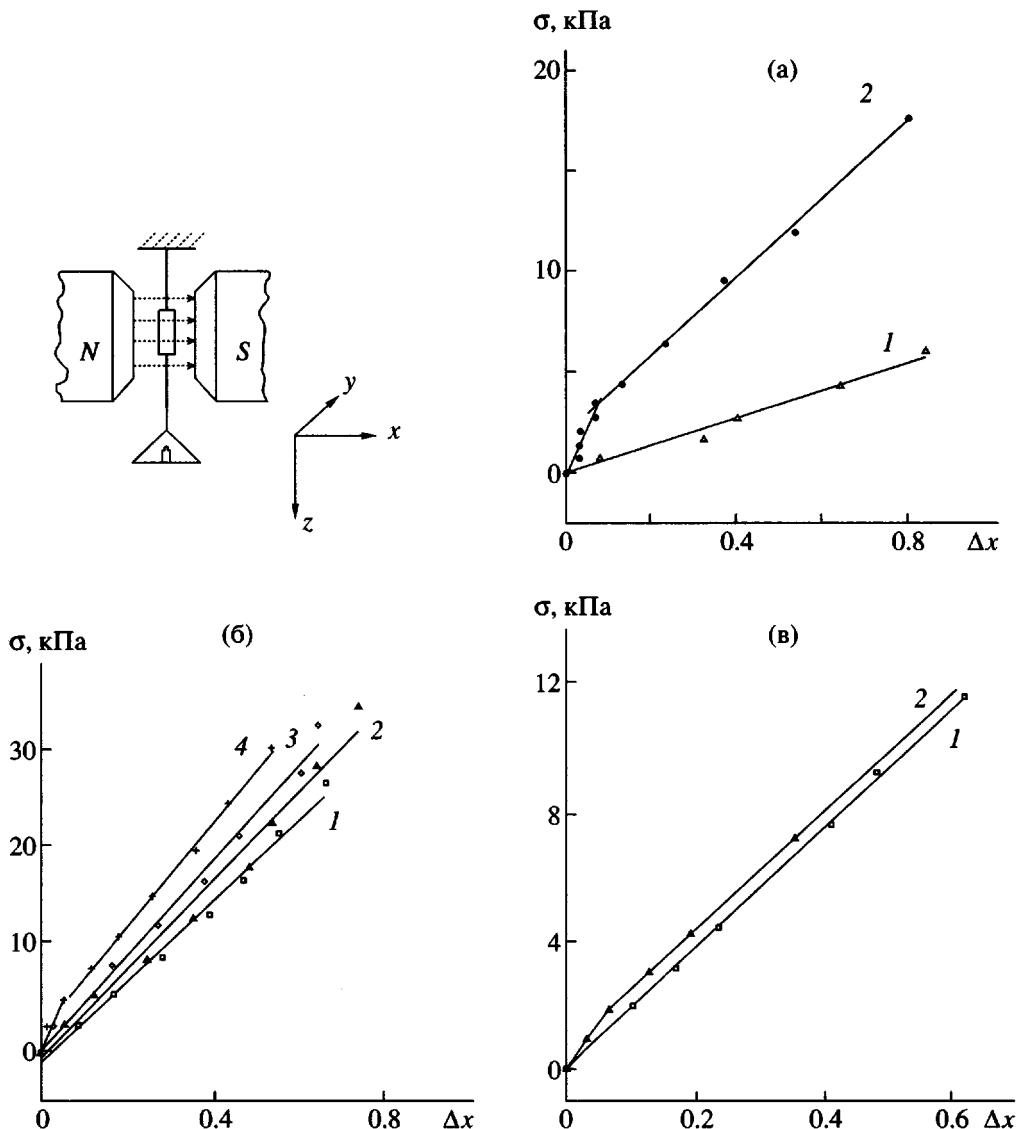


Рис. 3. Зависимости упругих напряжений σ от относительного удлинения Δx для магнитоэластиков с массовой концентрацией магнитной фазы: 42(а), 30 (б) и 24% (в), измеренные без поля и в различных магнитных полях. $E = 6.9 \times 10^3$ (а), 3.8×10^4 (б) и 1.9×10^4 Па (в). На вставке дана схема эксперимента.

совой доли магнитных частиц в составе магнитоэластика приводит к росту модуля Юнга.

Измерения модуля Юнга на образцах с большой величиной магнитодеформационного эффекта показали, что он лежит в пределах 10^3 – 10^4 Па; это значительно ниже значения модуля Юнга для структуроформирующего полимера без пластификатора ($E \sim 3.1 \times 10^5$ Па).

На рис. 3 приведена схема экспериментальной установки для исследования влияния магнитного поля на упругие и вязкие свойства магнитоэластиков. В ходе изучения упругих свойств измеряли удлинение цилиндрического или ленточного образца, помещенного в однородное магнитное по-

ле H , направленное перпендикулярно растягивающей силе F , в зависимости от величины этой силы. После чего рассчитывали зависимости упругих напряжений $\sigma = F/S$ от величины относительного удлинения образца $\Delta x = \Delta l/l_0$, где $\Delta l = l - l_0$ – удлинение образца, возникающее под действием силы F , l и l_0 – длина растянутого и нерастянутого образца соответственно, а S – сечение образца. Затем по построенным зависимостям $\sigma(\Delta x)$ определяли модуль Юнга.

Здесь следует отметить, что при помещении образцов в магнитное поле наблюдается увеличение их длины, которое для мягких образцов (с небольшим модулем Юнга) достигало 20% от перво-

начальной длины. Приведенные далее результаты рассчитаны для начальной длины l_0 , соответствующей равновесному состоянию образца (растягивающая сила $F = 0$) в магнитном поле или без поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружено, что приложение магнитного поля приводит к существенному увеличению модуля Юнга. В качестве примера на рис. 3а приведены зависимости σ от Δx для цилиндрического образца магнитоэластика диаметром 3.1 мм с концентрацией магнитной фазы 42 мас. % и модулем Юнга $E = 6.9 \times 10^3$ Па, измеренным в отсутствие магнитного поля (кривая 1). В качестве дисперсной магнитной фазы были использованы частицы железа размером ~ 2 мкм. Зависимость удельной намагниченности j этого магнитоэластика от величины внешнего магнитного поля в полях, меньших поля насыщения, имеет линейный характер (рис. 4а).

Как видно из рис. 3а, измеренная без поля зависимость $\sigma(\Delta x)$ имеет классический линейный характер. Однако после помещения образца в магнитное поле $H = 135.3$ кА/м зависимость $\sigma(\Delta x)$ (кривая 2) становилась нелинейной, при этом на ней можно выделить два участка с различными от первоначального (при $H = 0$) значениями модуля Юнга, причем на начальной стадии растяжения модуль Юнга – самым большой.

Исследование более “жестких” (с большей величиной модуля Юнга без поля) образцов с магнитными частицами того же размера показало, что при включении однородного магнитного поля H величина модуля Юнга также растет, однако начальный линейный участок в области малых Δx менее выражен и становится заметным только на зависимостях, измеренных при больших H . В качестве примера на рис. 3б приведены зависимости σ от Δx для более “жесткого” образца, представляющего собой полоску размером $36 \times 3.6 \times 0.55$ мм, вырезанную из магнитоэластика, содержащего 30 мас. % частиц железа с размером ~ 2 мкм и имеющего в отсутствие магнитного поля модуль Юнга $E = 3.8 \times 10^4$ Па. Зависимости были измерены без поля (кривая 1) и в магнитных полях $H = 58.1$, 106.7 и 135.3 кА/м (кривые 2, 3 и 4 соответственно). Из рисунка видно, что наиболее ярко выраженное присутствие двух линейных участков проявляется на зависимости, измеренной при $H = 135.3$ кА/м. Характер зависимости удельной намагниченности j от величины внешнего магнитного поля совпадает с характером зависимости, приведенной на рис. 4а.

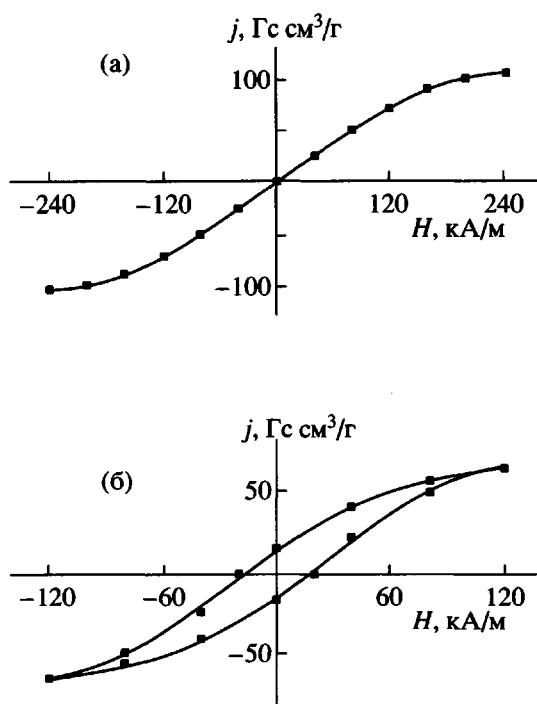


Рис. 4. Зависимости удельной намагниченности j от величины магнитного поля H для магнитоэластиков с железными частицами размером 2 мкм (а) и 110 Å (б).

При исследовании образцов с более мелкими частицами также наблюдали два линейных участка, при этом наклон второго участка практически совпадал с наклоном кривой для зависимости $\sigma(\Delta x)$, измеренной без магнитного поля. В качестве примера на рис. 3в приведены зависимости σ от Δx , измеренные на ленточном образце размером $28 \times 5.5 \times 1$ мм, вырезанном из магнитоэластика, содержащего 24 мас. % частиц железа с размером 110 Å и имеющего в отсутствие магнитного поля модуль Юнга $E = 1.9 \times 10^4$ Па. Магнитные характеристики этого магнитоэластика приведены на рис. 4б.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов нами рассмотрена модель, согласно которой при помещении образца в однородное магнитное поле имеет место внутреннее структурирование магнитных частиц.

Действующие в магнитном поле силы диполь-дипольного взаимодействия заставляют частицы смещаться из первоначального положения, деформируя высокоэластичную полимерную матрицу.

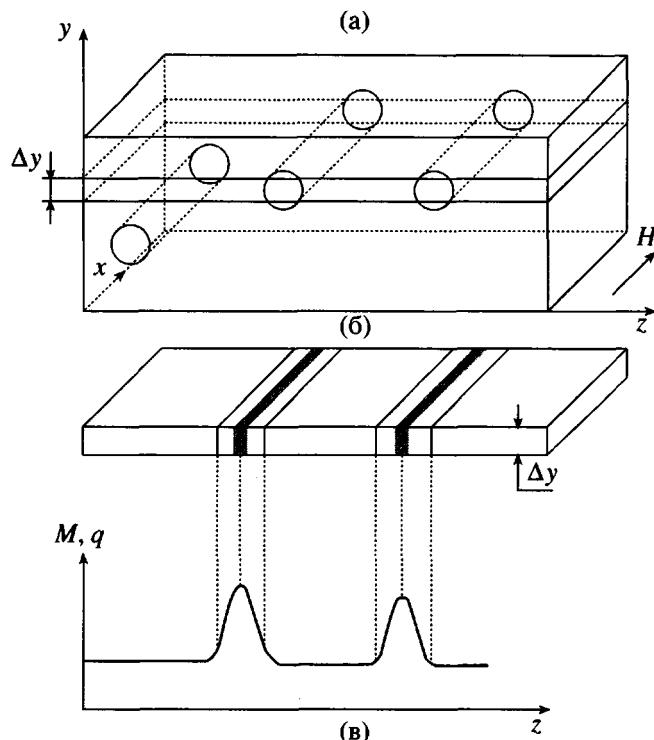


Рис. 5. Схематическое изображение структуры магнитоэластика, помещенного в однородное магнитное поле, с цилиндрическими областями сжатия полимерной матрицы (а), тонкого слоя толщиной Δy (б), а также распределение намагниченности и концентрации частиц вдоль направления z (в). Затемнена наиболее устойчивая к растяжению область с повышенной концентрацией магнитных частиц.

Энергия взаимодействия двух намагниченных частиц описывается с помощью следующего потенциала взаимодействия [13]:

$$U_{12} = (\mu_0/(4\pi r^3))[\mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2 - 3(\mathbf{m}_1 \mathbf{r})(\mathbf{m}_2 \mathbf{r})/(r^2)], \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, \mathbf{m}_1 и \mathbf{m}_2 – магнитные моменты частиц, \mathbf{r} – вектор, соединяющий центры частиц. В случае параллельности магнитных моментов в ориентирующем внешнем магнитном поле минимум энергии диполь-дипольного взаимодействия соответствует выстраиванию частиц вдоль одной линии.

Явление выстраивания магнитных частиц в цепи, направленной вдоль силовых линий магнитного поля, хорошо известно в физико-химии магнитных порошков, ферролаков, магнитных жидкостей и коллоидов. Находящиеся в магнитоэластике магнитные частицы, притягиваясь друг к другу, также стремятся образовать цепи. Однако полимерная матрица препятствует их объединению, и в образце образуются вытянутые вдоль силовых

линий и сжатые со всех сторон магнитными силами F_m цилиндрические области сжатого полимера (см. рис. 5а, на котором схематически изображена рассматриваемая в теоретической модели структура помещенного в однородное магнитное поле прямоугольного ленточного образца из магнитоэластика). Концентрация магнитных частиц в рассматриваемых цилиндрических областях выше, чем в растянутых, что выражается в росте локальной намагниченности и величины магнитных зарядов на торцах сжатых цилиндрических областей. Можно предположить, что именно взаимодействие одноименных полюсов, возникающих на торцах сжатых цилиндрических областей, вызывает наблюдаемое в эксперименте растяжение магнитоэластика в перпендикулярном внешнем магнитному полю направлении z . При этом в больших магнитных полях порядка 500–600 кА/м силы растягивания цилиндрических областей настолько велики, что на параллельной магнитному полю поверхности образца может появиться характерный многожильный рельеф. На рис. 6 приведены фотографии боковой поверхности цилиндрического образца магнитоэластика, содержащего 42 мас. % частиц железа с размером ~2 мкм и имеющего модуль Юнга $E = 6.9 \times 10^3$ Па, в полях $H = 16$ и 557.2 кА/м.

Для простоты рассмотрения упругих свойств таких неоднородно деформированных материалов разобъем изображенный на рис. 5а образец на тонкие слои толщиной Δy (рис. 5б). Видно, что в выделенном слое вдоль направления z наблюдается чередование областей сжатия и растяжения полимерной матрицы. При этом в случае однородного распределения цилиндрических областей по объему образца структура всех слоев одинакова, и по поведению одного из них можно судить о поведении образца в целом.

На рис. 5в схематически изображено вызванное диполь-дипольным взаимодействием перераспределение концентрации магнитных частиц, а следовательно, и намагниченности M магнитоэластика вдоль направления z .

При приложении вдоль направления z растягивающей силы F условие равновесия исходно растянутых участков может быть выражено в виде равенства внешней растягивающей силы F и возникающей при растяжении этих участков упругой силы $F_{\text{упр}}$

$$F = F_{\text{упр}} \quad (2)$$

В исходно сжатых магнитными силами областях магнитоэластика действующие на частицы магнитные сжимающие силы F_m уравновешены

упругими силами сжатого $F_{\text{упр.сж}}^*$ и растянутого $F_{\text{упр}}$ полимера, действующими на границе цилиндрических областей со стороны сжатых и растянутых областей магнитоэластика. Следует отметить, что величина сил упругого сжатия полимерной матрицы отличается от величины сил упругого растяжения. Так, модуль сжатия каучука (или сжимаемость) такой же, как у жидкости, порядка 2×10^9 Па. Однако модуль Юнга (около 10^6 Па) почти в 2000 раз меньше и в $\sim 2 \times 10^5$ раз уступает по величине модулю Юнга типичного твердого тела [14].

Условие равновесия на границе исходно сжатых участков может быть записано в виде

$$F_m = F_{\text{упр}} + F_{\text{упр.сж}}^* \quad (3)$$

Учитывая, что, согласно соотношению (2), возникающая в растянутых областях упругая сила $F_{\text{упр}}$, равна внешней действующей силе F , выражение (3) можно переписать в виде

$$F = F_m - F_{\text{упр.сж}}^* \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что с ростом внешней силы F величина силы упругого сжатия $F_{\text{упр.сж}}^*$ должна вначале уменьшиться до нуля, после чего первоначально сжатая область начинает растягиваться. При этом условие равновесия примет вид

$$F = F_m + F_{\text{упр.раст}}^*$$

или

$$F_{\text{упр.раст}}^* = F - F_m, \quad (5)$$

где $F_{\text{упр.раст}}^*$ – сила упругости исходно сжатой, а теперь под действием силы F – растянутой области магнитоэластика.

Суммарное удлинение всех первоначально растянутых участков под действием внешней силы F может быть записано в виде

$$\Delta l_1 = Fl_0(1 - k_1)/(SE) \quad (6)$$

Здесь k_1 – объемная доля рассматриваемого слоя толщиной Δy , исходно занятая областями сжатия, S – сечение слоя, E – модуль Юнга растягиваемого полимера.

Суммарное удлинение всех исходно сжатых областей до их перехода из сжатого состояния в растянутое обозначим как

$$\Delta l_2 = \varepsilon, \quad (7)$$

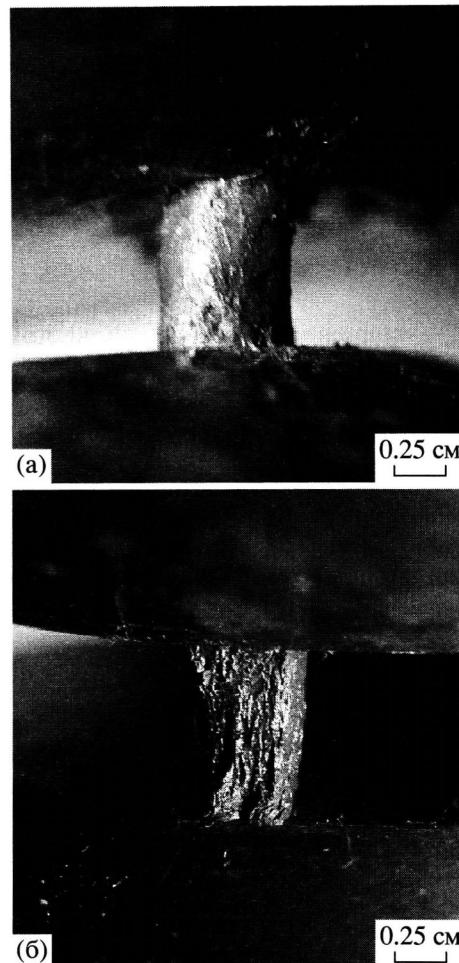


Рис. 6. Фотографии боковой поверхности цилиндрического образца магнитоэластика в однородных магнитных полях 16 (а) и 557.2 кА/м (б).

где ε – бесконечно малая величина, обусловленная малой сжимаемостью полимера в рассматриваемых цилиндрических областях сжатия.

Экспериментально измеряемый на начальном линейном участке модуль Юнга E_1 такой структуры до перехода сжатых областей в растянутое состояние может быть записан в виде

$$E_1 = Fl_0/(S(\Delta l_1 + \Delta l_2)) \quad (8)$$

После подстановки соотношений (6) и (7) в уравнение (8) имеем

$$E_1 = E/(1 - k_1) \quad (9)$$

Из полученного выражения следует, что магнитное взаимодействие, приводящее к образованию областей сжатия полимера также способствует увеличению модуля Юнга, наблюдаемому в эксперименте в области малых смещений Δx . После того, как растягивающая сила F (соотношение (5)) станет больше некоторой сжимающей

полимер магнитной силы F_m^* , начинается растяжение исходно сжатых областей, что выражается в уменьшении экспериментально измеряемого модуля Юнга до величины, которая на втором линейном участке может быть записана в виде

$$E_{II} = E(F - F_m^*[1 - F(k_1 - k)/(ES_0)]) / (F(1 - k) - F_m^*(1 - k_1)) \quad (10)$$

Здесь F_m^* – значение магнитной силы, при достижении которого исходно сжатые области начинают растягиваться, k – объемная доля сжатых областей, продолжающих существовать при данной растягивающей силе F .

В самом общем случае полный распад областей сжатого полимера достичим только при выключении внешнего магнитного поля. При условии $F \gg F_m^*$ модуль Юнга E_{II} на втором линейном участке стремится к значению

$$E_{II} = E/(1 - k), \quad (11)$$

которое в случае слабого магнитного взаимодействия частиц и полного растяжения сжатых областей силой F становится равным модулю Юнга полимера, измеренному в отсутствие магнитного поля, т.е. $E_{II} = E$.

Полученные для двух наблюдаемых в эксперименте линейных участков значения модуля Юнга (выражения (9) и (10)) показывают, что на начальном этапе растяжения образца, когда в магнитном поле существуют обширные области сжатого полимера, наблюдается значительное увеличение измеряемого модуля Юнга по сравнению с его исходным значением без поля.

Затем по мере роста внешней растягивающей силы F объемная доля сжатого полимера убывает, и мы выходим на второй линейный участок зависимости σ от Δx , характеризуемый незначительным изменением объемной доли все еще сжатого полимера, для растяжения которого требуются значительные усилия. При этом в зависимости от того, удалось ли на втором линейном участке полностью растянуть материал и, таким образом, в значительной степени уменьшить силы магнитного взаимодействия, или в материале существуют области полимера, по-прежнему сжатые магнитным взаимодействием частиц, модуль Юнга E_{II} соответственно может быть равен модулю Юнга, измеренному без поля, или превышать его.

Приведенные выше результаты относятся к растяжению тонкого слоя магнитоэластика толщиной D_u . Для нахождения значений E_I и E_{II} мате-

риала с произвольным объемом необходимо дополнительно учесть взаимодействие между соседними слоями, однако рассмотренная выше простая модель позволяет качественно описывать и сравнивать между собой упругие свойства различных магнитоэластиков.

Определив значения модуля Юнга в области малых деформаций Δx в поле и без поля, можно найти объемную долю исходно сжатых областей полимера k_1 , что позволит судить о характере взаимодействия магнитных частиц в магнитоэластике.

В работе были определены значения объемной доли сжатого полимера k_1 для образцов, зависимости $\sigma(\Delta x)$ которых приведены на рис. 3. Для магнитоэластиков, содержащих 42 (модуль Юнга без поля $E = 6.9 \times 10^3$ Па) и 30 ($E = 3.8 \times 10^4$ Па) мас. % частиц железа с размером ~2 мкм и 24 мас. % частиц железа с размером 110 Å ($E = 1.9 \times 10^4$ Па), объемные доли сжатого полимера, рассчитанные по формуле (9), составляют соответственно 0.85, 0.64 и 0.36.

Из полученных результатов следует, что при одинаковом размере довольно крупных магнитных частиц (~2 мкм) большему содержанию магнитных частиц соответствует и большая исходная объемная доля сжатого полимера. С увеличением растягивающей силы F объемная доля сжатого полимера уменьшается, следовательно, и измеряемый в магнитном поле модуль Юнга уменьшается до нового значения E_{II} (выражения (10) и (11)). На рис. 7а приведены результаты рассмотрения зависимости величин модулей Юнга E_I и E_{II} от внешнего однородного магнитного поля H для образца, представляющего собой полоску размером $36 \times 3.6 \times 0.55$ мм³, вырезанную из магнитоэластика с 30 мас. % частиц железа размером ~2 мкм; в отсутствие магнитного поля его модуль Юнга $E = 3.8 \times 10^4$ Па. Зависимости $\sigma(\Delta x)$ этого материала, измеренные в полях $H = 58.1, 106.7$ и 135.3 кА/м, приведены на рис. 3. Из рис. 7а следует, что с ростом величины внешнего структурирующего материала магнитного поля модуль Юнга E_I магнитоэластика нелинейно возрастает. Существенное увеличение E_I обусловлено ростом намагченности многодоменных частиц железа и, как следствие этого, увеличением диполь-дипольного взаимодействия. Это также отражается и на аналогичной зависимости E_{II} от H .

Зависимости остаточной объемной доли сжатых областей полимера k от величины структурирующего магнитного поля для двух различных растягивающих сил F , соответствующих второму ли-

нейному участку, рассчитанные по формуле (10), приведены на рис. 7б. Видно, что внешнее магнитное поле препятствует растяжению исходно сжатых областей полимерной матрицы, что отражается в росте E_{II} с увеличением внешнего магнитного поля. Характер зависимости объемной доли сжатых областей полимера k от величины растягивающей силы F для двух значений внешнего магнитного поля показан на рис. 7в. Видно, что на втором линейном участке зависимости $\sigma(\Delta x)$ в рассматриваемом интервале сил влияние силы F на k не столь значительно и сводится к некоторому уменьшению остаточной объемной доли сжатого полимера.

При рассмотрении магнитоэластика с мелкими магнитными частицами ($\sim 110 \text{ \AA}$) в магнитном поле $H = 135.3 \text{ kA/m}$ имеем незначительную объемную долю исходно сжатого полимера ($k_1 = 0.36$). При этом с ростом растягивающей силы F имеет место практически полное растяжение магнитоэластика, для которого модуль Юнга E_{II} близок к модулю Юнга E без поля.

Такое поведение магнитоэластика, видимо, связано с меньшей величиной сил диполь-дипольного взаимодействия более мелких магнитных частиц, имеющих меньший магнитный момент. Кроме того, как показали дополнительные исследования, мелкие магнитные частицы слабее связаны с полимерной матрицей, что также может несколько ослаблять взаимодействие магнитной подсистемы с упругой матрицей.

Анализ собственных колебаний пружинного маятника, в качестве пружины которого использовался цилиндрический образец магнитоэластика, показал, что в случае приложения однородного магнитного поля, направленного поперек образца, для некоторых образцов наблюдали интенсивное затухание колебаний. Так, количество колебаний до полной остановки маятника из магнитоэластика с магнитными железными частицами размером 2 мкм, $E = 4.2 \times 10^3 \text{ Па}$, длиной $\sim 40 \text{ мм}$ и периодом колебаний 0.4 с, при отклонениях от положения равновесия уменьшалось на 40% в магнитном поле $H = 58.1 \text{ kA/m}$. Однако такой же маятник с близкими геометрическими размерами и периодом колебаний, изготовленный из магнитоэластика с размером железных частиц 110 \AA и модулем Юнга $E = 1.6 \times 10^4 \text{ Па}$ при равных отклонениях от положения равновесия в поле $H = 58.1 \text{ kA/m}$ и без поля, производил до остановки практически то же количество колебаний.

Наблюдаемое в экспериментах уменьшение числа колебаний маятника до его полной остановки в магнитном поле по сравнению с анало-

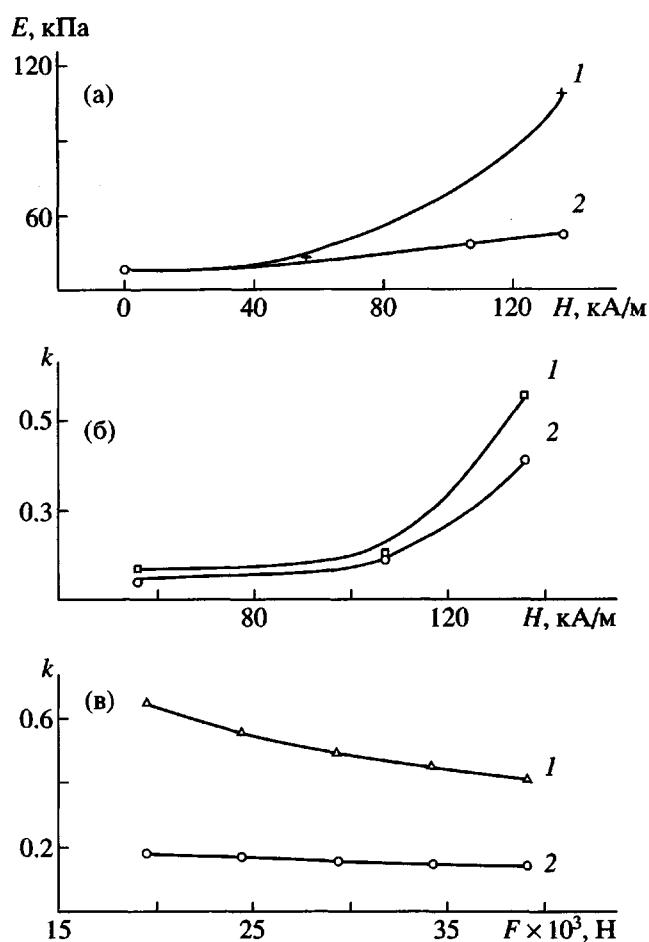


Рис. 7. Зависимости модулей Юнга E_I (1) и E_{II} (2) от величины внешнего магнитного поля (а), зависимости объемной доли k сжатых областей от величины магнитного поля (б) для $F = 24 \times 10^{-3}$ (1) и $39 \times 10^{-3} \text{ Н}$ (2) и от растягивающей силы F (в) для двух значений магнитного поля $H = 135.3 \text{ кA/m}$ (1) и 58.1 кA/m (2).

гичным числом колебаний без магнитного поля указывает на увеличение внутренней вязкости магнитоэластиков в магнитном поле. При этом повышение вязкости коррелирует с ростом объемной доли сжатого полимера.

ВЫВОДЫ

Экспериментально обнаружено сильное влияние внешнего магнитного поля на упругие и вязкие свойства магнитоэластиков и предложена модель, описывающая влияние магнитного поля на упругие характеристики этих материалов. В рамках рассматриваемой модели получены выражения для модулей Юнга двух экспериментально наблюдавшихся в однородном магнитном поле линейных участков зависимостей $\sigma(\Delta x)$.

На основе полученных экспериментальных данных рассмотрено влияние внешнего магнитного поля и растягивающей магнитоэластик силы F на объемную долю областей, сжатых магнитным взаимодействием частиц. Обнаружено влияние внешнего магнитного поля на увеличение вязкости магнитоэластиков с большой объемной долей сжатого полимера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Г., Корнев А.Е. Магнитные эластомеры. М.: Химия, 1987.
2. Zrinyi M., Barsi L., Duki A. // J. Chem. Phys. 1996. V. 104. № 21. P. 8750.
3. Zrinyi M., Barsi L., Szabo D. // J. Chem. Phys. 1997. V. 106. № 13. P. 5685.
4. Zrinyi M., Szabo D., Kilian H.-G. // Polym. Gels and Networks. 1998. V. 6. P. 441.
5. Dumas J., Bacri J.-C. // J. Phys., Lett. 1980. V. 41. P. 279.
6. Никитин Л.В., Николаев А.Л., Миронова Л.С., Чичерин Д.С. // Тез. докл. 11 Междунар. зимней школы по механике сплошных сред. Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 1997. С. 222.
7. Raphael E., de Gennes P.-G. // C.R. Acad. Sci. Paris. Ser. IIb. 1997. V. 325. P. 537.
8. Никитин Л.В., Левина Е.Ф., Степанов Г.В., Миронова Л.С. // Тез. докл. XVI Междунар. школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". М.: УРСС, 1998. С. 389.
9. Никитин Л.В., Корнев К.Г., Миронова Л.С. // Науч. тр. 8 Междунар. плесской конф. по магнитным жидкостям. М.: МГУ, 1998. С. 95.
10. Nikitin L.V., Kornev K.G., Mironova L.S. // Abstrs Int. Conf. on Colloid Chemistry and Physical-Chemical Mechanics. Moscow, 1998. P. 264.
11. Nikitin L.V., Mironova L.S., Kornev K.G., Stepanov G.V., Samus A.N. // Proc. Moscow Int. Symp. on Magnetism. Moscow, 1999. Pt. II. P. 231.
12. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982.
13. Ахиезер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны. М.: Наука, 1967.
14. Лодж А. Эластичные жидкости. М.: Наука, 1969.

The Influence of Magnetic Field on the Elastic and Viscous Properties of Magnetoelastics

L. V. Nikitin*, L. S. Mironova*, G. V. Stepanov**, and A. N. Samus**

*Faculty of Physics, Moscow State University,
Vorob'evy gory, Moscow, 119899 Russia

**State Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds,
sh. Entuziastov 38, Moscow, 111123 Russia

Abstract—The effect of a uniform magnetic field on the viscoelastic properties of new, rubber-elastic, magnetically guided polymeric materials (magnetoelastics) capable of substantial deformation in an external magnetic field was studied. It was found that the application of a magnetic field leads to a considerable rise in the Young modulus and in the viscosity coefficient of these materials. A model is proposed which describes the effect of magnetic field on the elasticity parameters. Based on the obtained experimental data, the influence of an external magnetic field and a magnetoelastic-stretching force F on the volume fraction of polymer regions contracted by interaction of magnetic particles is considered in terms of the proposed theoretical model.