

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАЗУПРОЧНЕНИЯ В МАГНИТОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРАХ \*

О.В. Столбов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

---

**Для цитирования:**

Столбов О.В. Моделирование эффекта разупрочнения в магнитоактивных эластомерах // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2021. – № 3. – С. 13–16.  
<https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.3.2>

---

Магнитоактивные эластомеры (МАЭ) представляют собой композиты, в которых полимерная матрица наполнена микрочастицами изотропного ферромагнетика с низкой коэрцитивной силой. Функциональность таких материалов обусловлена их способностью изменять структуру под влиянием внешнего магнитного поля и определяется взаимодействием частиц и матрицы на мезоскопических (порядка размеров частиц) масштабах. В МАЭ экспериментально наблюдается эффект разупрочнения, который заключается в том, что в диапазоне деформаций от 0,1 до 1% эффективный модуль упругости материала резко падает. Данная работа посвящена созданию простой численной модели, качественно описывающей такой эффект разупрочнения. Рассматривается образование цепочки частиц в приложенном магнитном поле и её разрушение под действием растягивающих и сжимающих механических сил. Полученные результаты объясняют механизмы разупрочнения в МАЭ.

**Ключевые слова:** *магнитоактивный эластомер, магнитомеханика, магнитоупругость.*

Магнитоактивные эластомеры (МАЭ) представляют собой композиты, в которых полимерная матрица наполнена микрочастицами изотропного ферромагнетика с низкой коэрцитивной силой, например частицами карбонильного железа с дисперсностью 2–5 мкм. Помимо магнитной мягкости (низкой анизотропии) самого материала, частицы микронного размера являются многодоменными, что дает безгистерезисное намагничивание их под действием приложенного магнитного поля. Это поле индуцирует магнитные моменты в частицах и, таким образом, между ними возникают магнитостатические силы. В результате этих взаимодействий частицы начинают перегруппировку, вызывая деформацию полимерной матрицы. Совместные результаты этих мезоскопических процессов имеют много интерес-

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-41-590160.

ных проявлений в макроскопическом масштабе, которые включают эффекты изменения формы, а также изменение реологических характеристик МАЭ (например, увеличение модуля упругости под действием поля). Таким образом, возможность управления магнитным полем делает МАЭ функциональными материалами с широким спектром применения.

В данной работе мы развиваем модель, которая описывает мезоскопические эффекты, лежащие в основе некоторых важных особенностей, наблюдаемых в механическом поведении МАЭ. В частности, мы обращаемся к эффекту, который давно известен из экспериментов, но до сих пор остается малоизученным. А именно, если намагниченный образец МАЭ подвергается небольшой одноосной деформации  $\varepsilon$ , его эффективный модуль упругости  $E$  оказывается сильно нелинейной функцией деформации:  $E$  при  $\varepsilon \sim 0,1\%$  на порядок больше, чем при  $\varepsilon \sim 1\%$ . Другими словами, в этом диапазоне деформаций эффективный модуль упругости резко падает, т.е. композит демонстрирует значительное разупрочнение, что является довольно неожиданным эффектом [1].

Мы основываем свое объяснение на следующей простой модели. Для качественного описания этого эффекта рассмот-

рим структурный элемент композита в форме вытянутого параллелепипеда размером  $20R \times 3R \times 3R$ . В нем 10 частиц сферической формы и одинакового радиуса  $R$  случайно распределены внутри объема структурного элемента. Выбор размера элемента обусловлен тем, что поперечный размер элемента не дает возможности двум частицам встать бок о бок. Таким образом получается, что в исходном состоянии частицы представляют собой неидеальную цепочечную структуру, где центры частиц не расположены на одной линии и частицы не находятся в тесном контакте (рис. 1, а и 2, а). При включении поля под действием магнитоэлектростатических сил частицы слипаются и, противодействуя упругим возвращающим силам, создаваемым матрицей, приближают свои центры к прямой, параллельной направлению поля (рис. 1, б и 2, б). По мере уменьшения зазоров между частицами образец приобретает отрицательную деформацию  $\varepsilon_0$ , что можно интерпретировать как проявление эффекта структурной магнитострикции, поскольку механическая нагрузка отсутствует и размагничивающий фактор для вытянутого элемента мал.

Затем на верхнюю торцевую стенку структурного элемента композита прикладываются растущие усилия сжатия

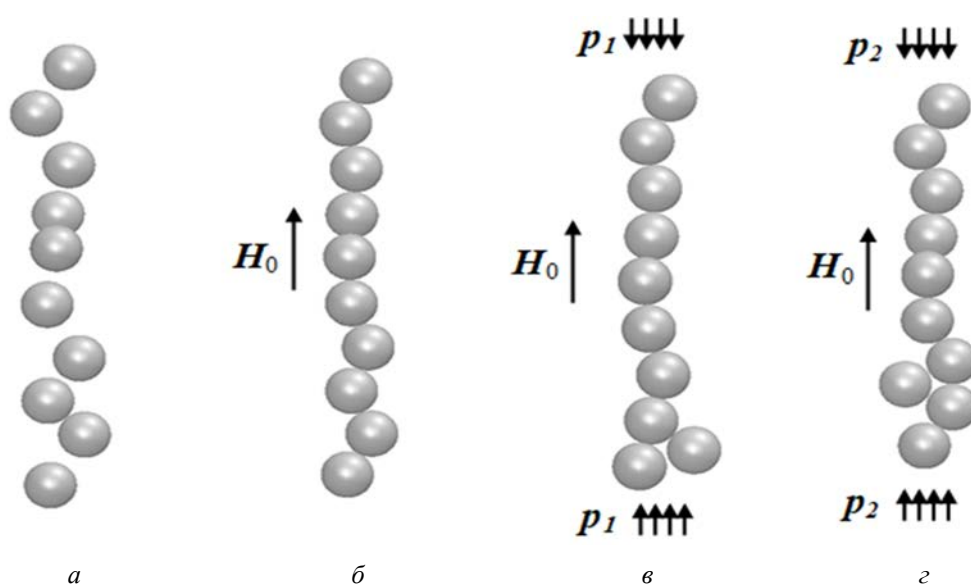


Рис. 1. Распределение частиц внутри структурного элемента: а – начальное состояние; б – образование цепочки в магнитном поле  $H_0$ ; в, г – магнитное поле  $H_0$  и сжимающие усилия  $p_1$  и  $p_2$  соответственно;  $p_1 < p_2$

(рис. 1, в-г) либо растягивающие усилия (рис. 2, в-г). Под их действием прямолинейная конфигурация цепи постепенно искажается. Хотя это не совсем так, но можно сравнить происходящую эволюцию цепочки с эйлеровой неустойчивостью тонкого стержня (в случае сжатия), где порог «размазан» из-за наличия упругой матрицы вокруг цепочки частиц

Представленные выше рисунки получены в результате численного решения модельной задачи, выполненного методом, описанным в работе [2]. Алгоритм организован следующим образом. Сначала для образца заданной формы методом конечных элементов при заданных граничных

условиях вычисляется тензор линейного отклика  $L$ , связывающий между собой смещения границ образца и частиц внутри него для заданного на них распределения сил. Полная энергия системы берётся в виде суммы упругой (вычисляемой с помощью  $L$ ) и магнитной энергий, а затем ищется минимум этой функции для каждого значения приложенного магнитного поля в предположении о несжимаемости матрицы и о взаимной непроницаемости частиц. Таким образом, определяются равновесные смещения каждой из частиц и деформация границ образца МАЭ.

На рис. 3 показаны зависимости безразмерного напряжения  $|p|/G_m$  от дефор-

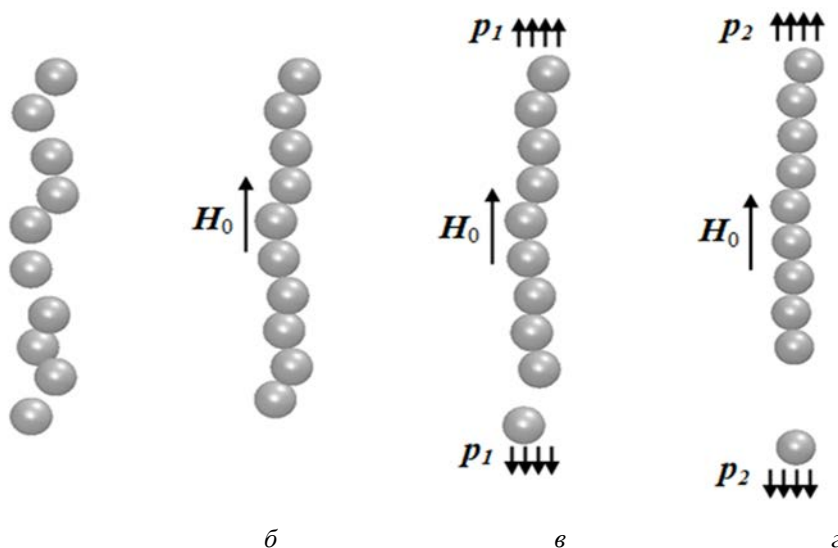


Рис. 2. Распределение частиц внутри структурного элемента: а – начальное состояние; б – образование цепочки в магнитном поле  $H_0$ ; в, г – магнитное поле  $H_0$  и растягивающие усилия  $p_1$  и  $p_2$  соответственно;  $p_1 < p_2$

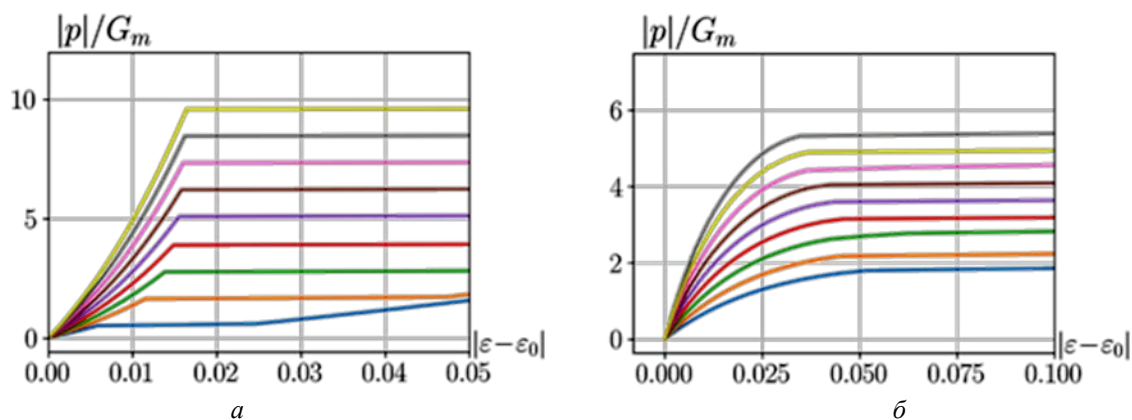


Рис. 3. а – зависимости безразмерного растягивающего усилия  $|p|/G_m$  от деформации образца. Значения квадратов магнитных полей снизу вверх  $H_0^2/G_m = 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120$ ; б – зависимости безразмерного сжимающего усилия  $|p|/G_m$  от деформации образца. Значения квадратов магнитных полей снизу вверх  $H_0^2/G_m = 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120$

мации образца ( $G_m$  – модуль сдвига матрицы), т.е. аналоги обычных кривых напряжение-деформация при различных значениях магнитного поля. Как видно, после разрыва линейной конфигурации цепи касательная к представленной кривой (т.е. эффективный модуль Юнга) становится значительно меньше, чем у на-

чальной части графика. Разумеется, изложенные выше соображения нельзя напрямую распространить на макроскопическое поведение МАЭ при совместном действии магнитного поля и механической нагрузки. Однако наблюдается качественное сходство зависимости напряжения от деформации с экспериментом [1].

#### Библиографический список

1. *Stepanov G.V., Abramchuk S.S., Grishin D.A., Nikitin L.V., Kramarenko E.Yu., Khokhlov A.R.* Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers // *Polymer*. – 2007. – Vol. 48. – № 2. – P. 488–495.
2. *Столбов О.В.* Деформация магнитного эластомера с учетом магнитоиндуцированного структурообразования. // *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*. – 2016. – № 4. – С. 78–81.

### MODELING THE EFFECT OF SOFTENING IN MAGNETOACTIVE ELASTOMERS

O.V. Stolbov

*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS*

#### For citation:

*Stolbov O.V.* Modeling the effect of softening in magnetoactive elastomers // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2021. – № 3. – P. 13–16. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.3.2>

Magnetoactive elastomers (MAE) are composites in which a polymer matrix is filled with microparticles of an isotropic ferromagnet with a low coercive force. The functionality of such materials is due to their ability to change the structure under the influence of an external magnetic field and is determined by the interaction of particles and a matrix on mesoscopic (the order of particle size) scales. In MAE, the effect of softening has been experimentally observed. This effect consists in the fact that in the range of deformations from 0,1 to 1%, the effective modulus of elasticity of the material drops sharply. This work looks into the development of a simple numerical model that qualitatively describes this softening effect. The formation of a chain of particles in an applied magnetic field and its destruction under the action of tensile and compressive mechanical forces are considered. The obtained results clarified the mechanisms of softening in MAE.

*Keywords: magnetoactive elastomer, magnetomechanics, magnetoelasticity.*

#### Сведения об авторе

*Столбов Олег Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: sov@icmm.ru

*Материал поступил в редакцию 31.03.2021 г.*