

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ МАГНИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Степанов Г.В.

начальник лаборатории магнитных пигментов и композитов АО «ГНИИХТЭОС» Москва

Борин Д.Ю.

к.т.н. научный сотрудник, Институт Мехатронного Машиностроения, Технический Университет Дрездена, Германия.

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию магнитных свойств магнитоактивных эластомеров (магнитных композитов) с магнитотвёрдым наполнителем. Выявлено, что особенности магнитных свойств таких композитов определяются не только свойствами наполнителя, но и упругими свойствами полимерной матрицы. Процессы намагничивания и перемангничивания таких материалов связаны с процессами структурирования и вращения частиц внутри полимерной матрицы.*

***Ключевые слова:** магнито-активный эластомер, гистерезис, магнитотвёрдый, неодимовый магнит*

STRUCTURE FORMATION DURING MAGNETIZATION AND REMAGNIZATION OF MAGNETIC ELASTOMERS

Stepanov G.V.

Head of the laboratory of magnetic pigments and composites of JSC "GNIKHTEOS" - Russian Technological Institute

Borin D.Yu.

Ph.D. Institute of Mechatronic Engineering, Technische Universitat Dresden, 01062 Dresden, Germany.

***Annotation.** The work is devoted to the study of the magnetic properties of magnetoactive elastomers (magnetic composites) with a hard magnetic filler. It was revealed that the features of the magnetic properties of such composites are determined not only by the properties of the magnetic filler, but also by the elastic properties of the polymer matrix. The processes of magnetization and remagnetization of such materials are associated with the structuring and rotation of particles within the polymer matrix.*

***Keywords:** magnetically active elastomer, hysteresis, hard magnetic, neodymium magnet*

Популярным научным направлением в последние годы стало исследование магнитных эластомеров, свойства которых изменяются под действием магнитного поля. Такие материалы относятся к классу так называемых «умных» материалов («smart materials»). Изначально они были названы магнитореологическим эластомерам, поскольку их вязкоупругие свойства изменяются под действием магнитного поля. Однако, в дальнейших исследованиях выяснилось, что данный тип материалов обладает широким спектром свойств, таких как магнитодеформационный и магнитострикционный эффект, магниторезистивный, магнитопьезорезистивный и

магнитооптический эффект, эффект памяти формы [1] и др. Поэтому в научной литературе используются более общие названия, такие как магнитоактивные эластомеры (МАЭ), магнитные гели, и др. Данные материалы представляют собой композит из магнитных частиц, как правило магнитомягких, в эластичной полимерной матрице. Дальнейшим развитием классических МАЭ является их наполнение смесью магнитожёстких и магнитомягких частиц. Создание композитов с таким сложным наполнением направлено на расширение свойств и применимости магнито реологических эластомеров в демпфирующих и сенсорных устройствах [2-3]. Первичные исследования магнитных свойств магнито реологических эластомеров со сложным наполнителем показало у них наличие аномальных свойств в процессе намагничивания и перемагничивания [4]. Чтобы разобраться в данных процессах, проводились исследования образцов композита на основе магнитотвёрдого наполнителя. В качестве такого наполнителя использовались порошки сплава неодим-железо-бор (NdFeB) с различными магнитными свойствами. Выявлено, что характер петли магнитного гистерезиса зависит не только от магнитных свойств магнитного наполнителя, но и от свойств полимерной матрицы. Если в жёсткой полимерной матрице петли гистерезиса практически совпадают для магнитного порошка и магнитного композита, то с понижением модуля упругости петля гистерезиса для композита начинает значительно изменяться. Коэрцитивная сила для магнитного композита с мягкой полимерной матрицей значительно снижается, как будто матрица наполнена магнитомягким наполнителем. Если сравнить петли гистерезиса для магнитного эластомера при разных полях намагничивания (рис 1), то видно, что с определённого поля петля гистерезиса становится уже и петли являются несимметричными. Несимметричность зависит от направления первичного намагничивания. В данном эксперименте исходный образец намагничивается в направлении точки 1, намагничивается ступенчато при максимальных полях 6, 9, 12, 15, 18 кЭ. Для каждого максимального поля измеряется полная петля гистерезиса. Движение по петле гистерезиса с точки 1 до точки 2 обозначено «Forv», а от точки 2 к точке 1 обозначено как «Back». Рассмотрим подробно петли гистерезиса, а именно зависимость величины коэрцитивной силы от максимального поля намагничивания (рис. 2)

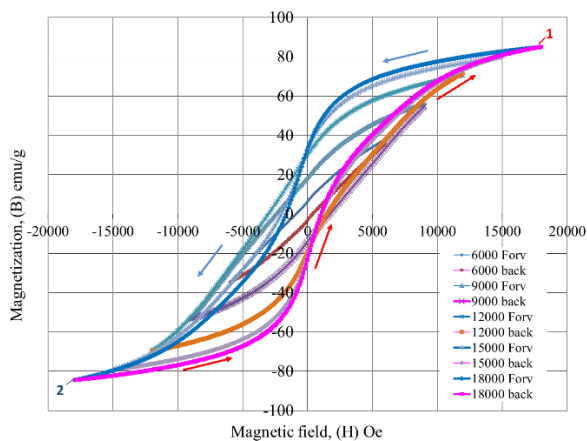


Рис.1 Петли гистерезиса МАЭ для магнитных полей 6, 9, 12, 15, 18 кЭ

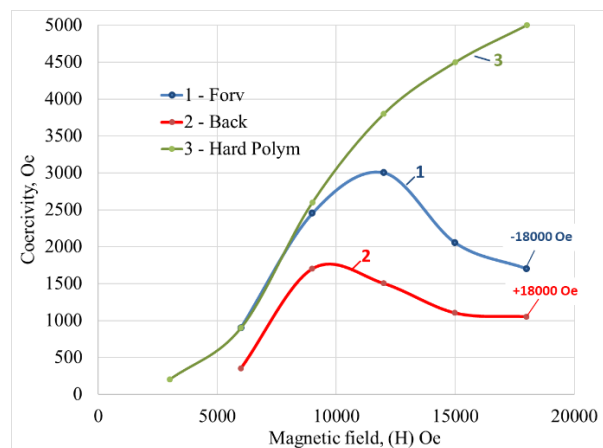


Рис.2 Коэрцитивная сила МАЭ в зависимости от величины и направления поля намагничивания. 1,2- вниз и вверх для мягкой матрицы. 3 – жёсткая матрица

На рис 2 мы видим аномальные значения коэрцитивной силы в зависимости от максимального поля намагничивания, как для положительного, так и для отрицательного направлений. При увеличении поля намагничивания магнитожёсткого материала, коэрцитивная сила начинает расти. Для классического магнитожёсткого материала она непрерывно растёт до достижения магнитного насыщения материала. В нашем случае, после увеличения в средних магнитных полях, она начинает уменьшаться с увеличением поля намагничивания. К тому же петля является несимметричной. Коэрцитивная сила (1) при перемагничивании из точки 1 в точку 2

(рис.1) почти в 2 раза выше коэрцитивной силы полученной при перемагничивании в исходную точку (1) из точки (2). Очевидно, что характер полученных кривых определяется как магнитными свойствами магнитожёсткого наполнителя, так и величиной упругости полимерной матрицы в которую помещены частицы.

Данный эффект связан с процессами вращения намагниченных магнитных частиц внутри полимерной матрицы. На первом этапе, когда магнитные поля небольшие и намагниченность магнитного наполнителя невелика, процесс перемагничивания (точки 1-2-1) идёт классическим образом. Процесс перемагничивания происходит за счет переориентации магнитного момента в соответствии с ориентацией магнитного поля. При увеличении поля намагничивания в направлении точки 1, происходит увеличение остаточной намагниченности наполнителя. При последующем перемагничивании из точки 1 в точку 2 (рис.1), часть частиц перемагничивается классическим образом, а часть частиц, имеющих больший магнитный момент не перемагничивается, а вращается, преодолевая силы упругости полимерной матрицы. Таким образом, изменяется направление намагниченности индивидуальных частиц и, соответственно, композита в целом. Это процесс квази-статистический, поскольку часть частиц вращается, а часть перемагничивается. По мере увеличения магнитного поля и увеличения остаточной намагниченности, всё больше частиц изменяют направление магнитного момента за счет изменения пространственной ориентации и величина кажущейся коэрцитивной силы уменьшается (кривая 1, рис. 2).

Асимметричность петли гистерезиса (рис.1) также отражает разница между коэрцитивными силами при различных направлениях магнитного поля (рис. 2). Эта разница зависит от направления первичного намагничивания и величины упругости полимерной матрицы. Если при первичном перемагничивании из точки 1 в направлении точки 2, частица при вращении преодолевает упругие силы полимерной матрицы, то при перемагничивании в начальное направление (из точки 2 в точку 1. рис 1), (кривая 2, рис.2) силы полимерной матрицы стремятся вернуть частицу в состояние её нормальной ориентации. Т.е. полимерная матрица в последнем случае старается развернуть частицу в направление её первоначальной ориентации (back) при намагничивании. Поэтому и коэрцитивная сила в этом направлении меньше (кривая 2, рис. 2), чем при первичном перемагничивании из точки 1 в точку 2, рис.1. (кривая 1, рис. 2). Для сравнения дана кривая зависимости коэрцитивной силы от поля намагничивания для композита с жёсткой матрицей (кривая 3, рис. 2). Рассмотренные эффекты должны быть приняты во внимание в контексте практических инженерных применений магнитореологических эластомеров, имеющих в своем составе магнитожёсткий наполнитель.

Работа поддержана РФФИ №19-53-12039 и DFG No. Wo 3343/3-1

Список использованных источников:

1. Степанов Г.В., Крамаренко Е.Ю. Двенадцать свойств магнитоактивного эластомера. В сборнике: 17-я Международная плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Сборник научных трудов. 2016. С. 187-197.
2. G. V. Stepanov, D. Yu. Borin, E. Yu. Kramarenko, Magnetoactive Elastomer Based on Magnetically Hard Filler: Synthesis and Study of Viscoelastic and Damping Properties // Polymer Science, Ser. A, 2014, Vol. 56, No. 5, pp. 603–613.
3. Stepanov G.V., Chertovich A.V., Kramarenko E.Y. Magnetorheological and deformation properties of magnetically controlled elastomers with hard magnetic filler // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012, Vol. 324, № 21, pp. 3448 – 3451.
4. G. V. Stepanov, D Yu Borin, A.V. Bakhtiarov and P.A. Storozhenko. Magnetic properties of hybrid elastomers with magnetically hard fillers: rotation of particles // Smart Mater. Struct. 2017, V. 26, №3, 035060 (10pp), <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa5d3c>