

УДК 539.3

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*П.А. Александров, В.В. Бударагин, М.Н. Шахов (РНЦ «Курчатовский институт»),
Н.И. Никанорова, Е.С. Трофимчук (МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет)*

Представлены экспериментальные результаты по влиянию слабых магнитных полей на механические свойства различных немагнитных материалов: малоцикловая усталость при изгибной деформации цилиндрической проволоки, а также упругость и прочность полимеров при постоянной скорости деформации. Установлено существенное влияние магнитного поля на поведение материалов в условиях внешнего механического нагружения. Рассмотрены физические причины наблюдаемых эффектов.

MECHANICAL PROPERTIES OF CERTAIN MATERIALS IN MAGNETIC FIELDS. P.A. ALEKSANDROV, V.V. BUDARAGIN, M.N. SHAKHOV, N.I. NIKANOROVA, E.S. TROFIMCHUK. The experimental results on the influence of low magnetic field on the mechanical properties of different nonmagnetic materials are described: low-cycle fatigue in bending of cylindrical wires, as well as elasticity and strength of polymers at steady deformation rates. The essential influence of magnetic fields on the behavior of materials under external mechanical loading was found. The physical backgrounds of the observed effects are considered.

В последнее время проводятся активные исследования поведения твердого тела в магнитном поле и обнаружены весьма интересные эффекты, с которыми можно познакомиться в обзоре [1]. Этот обзор посвящен последовательному описанию магнито-пластических эффектов в твердых телах, в основном, в кристаллических диэлектриках и связаны со специфическим поведением дислокаций в магнитном поле. Основной трудностью объяснения таких эффектов является слабость взаимодействия точечного дефекта со спином с магнитным полем. Поэтому считается, что магнитопластические эффекты — это динамические эффекты, и магнитное поле влияет на движение дислокаций, взаимодействие их со стопорами. Основываясь на данных рассуждениях, мы предположили, что магнитное поле может оказывать влияние на некоторые механические свойства материалов, в частности на усталость. В ходе экспериментов был обнаружен ряд интересных явлений как для металлов, так и для полимерных материалов.

Для металлов были проведены испытания на усталость в магнитном поле. Усталость — это явление, связанное с генерацией и движением дислокаций под действием механического напряжения. Дислокации могут останавливаться на стопорах, т.е. больших потенциальных барьерах, связанных с дефектами решетки, и их накопление приводит к появлению микротрещин, а затем излому образца. Дислокация представляет собой совокупность разорванных связей в кристалле и может из-за этого обладать магнитным моментом. Понятно, что если взаимодействие дислокаций с дефектом зависит от магнитного поля, то вся картина усталости металла в поле может сильно измениться.

Исследовалась малоцикловая усталость при изгибной деформации цилиндрической проволоки в магнитном поле и без него. Проволока была выбрана потому, что технология ее производства обеспечивала однородность по диаметру вдоль всего образца. Циклический изгиб производился на 180° по направляющей диаметром 7 мм. Магнитное поле создавалось двумя постоянными магнитами размером $60 \times 32 \times 17$ мм с зазором между ними 3 мм. Магнитное поле в зазоре было измерено магнитометром Ш1-8 и составляло 0,79 Тл. В эксперименте измерялось количество циклов деформации проволоки из различных металлов до излома, затем в аналогичных условиях (т.е. с теми же углом и радиусом изгиба) проводился эксперимент без магнитного поля.

Полученные результаты представлены в табл. 1 и свидетельствуют о заметном влиянии магнитного поля на усталость образцов.

Т а б л и ц а 1. Влияние магнитного поля на усталость образцов

Материал образца	Диаметр образца, мм	Количество циклов до разрушения
Медь, неотожженная	1,5	В поле — 180, 180, 156, 209, 119, 211 Без поля — 75, 111, 118, 106, 116
Медь, неотожженная	2,5	В поле — 22, 23, 21, 25, 22, 24 Без поля — 33, 24, 24, 23, 30, 39, 23
Медь, неотожженная в ПВХ-изоляции	2,5	В поле — 123, 72, 86, 138, 100 Без поля — 127, 114, 90, 118, 64
Медь, отожженная ¹	2,5	В поле — 35, 29, 40, 29, 28, 31, 36 Без поля — 44, 41, 42, 43, 34, 39
Алюминий	1,5	В поле — 7, 7, 6, 8, 7, 7 Без поля — 6, 6, 7, 6, 7, 5
Вольфрам—рений	1,5	В поле — 7, 17, 4, 16, 1 Без поля — 15, 21, 1, 1, 7, 12
Свинец	$3,0 \times 1^2$	В поле — 10, 14, 12, 15, 13, 22 Без поля — 20, 18, 27, 27, 29, 20

Цирконий Э110	3,0	В поле — 23, 22, 23 Без поля — 56, 53, 52
Латунь	2,0	В поле — 78, 88, 89, 84, 96 Без поля — 160, 164, 147, 154

¹Отжиг: нагрев до 700 °С за 50 мин, выдержка в течение 30 мин и затем охлаждение в печи приблизительно в течение 6 ч до комнатной температуры.

²Образцы в виде полоски, приведен размер сечения.

Для проволоки из электротехнической меди полученные результаты достаточно противоречивы: в первой серии экспериментов разрушение образцов происходило быстрее при нагружении без магнитного поля, а в остальных наоборот. Кроме того, следует заметить, что наблюдается разброс полученных результатов и это может быть связано с термической и деформационной предысторией образцов. Тем не менее, несмотря на полученный разброс результатов, эффект от влияния магнитного поля отчетливо заметен. Отжиг медной проволоки был проведен, чтобы проверить влияние адсорбированного кислорода и возникающей со временем в медных образцах дислокационной структуры. Для отожженной проволоки разброс результатов несколько меньше и эффект также наблюдается.

Для образцов из алюминия существенной разницы между количеством циклов до разрушения в магнитном поле и без него не замечено.

Для вольфрам-рениевой проволоки наблюдается большой разброс результатов, связанный с значительной неоднородностью образцов, поэтому полученные результаты не могут свидетельствовать о наличии или отсутствии эффекта.

Образцы из свинца (в отличие от других в виде полосок) с достаточно хорошей повторяемостью разрушаются быстрее в магнитном поле.

Образцы из сплава циркония Э-110 значительно быстрее разрушаются в магнитном поле: количество циклов до разрушения в магнитном поле в 2 раза меньше, чем без поля. Разброс полученных результатов невелик, однако из-за ограниченного количества образцов проведено только по 3 испытания. Тем не менее полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии магнитного поля на усталостные характеристики данного материала.

Для образцов из латуни наблюдается существенное снижение количества циклов до разрушения при проведении нагружения в магнитном поле. Количество циклов до разрушения снижается приблизительно в 2 раза. Разброс полученных результатов для образцов из латуни наименьший из всех испытанных материалов.

Сформулируем условия, при которых может наблюдаться влияние магнитного поля на механические свойства металла. Во-первых, образец должен находиться в напряженном состоянии, чтобы было движение дислокаций. Могут наблюдаться как напряжения от приложения внешней силы, так и остаточные напряжения, появившиеся в образце в ходе его изготовления. Во-вторых, необходимо наличие парамагнитных дефектов. Однако их может быть очень мало, так как дислокация при своем движении проходит довольно большой путь (сотни и тысячи межатомных расстояний), поэтому может быть достаточно фоновых примесей (см. эксперимент с медью). Отсюда видно, что наблюдаемый эффект может быть интересен не только с точки зрения физики металлов, но и иметь существенное значение в технических приложениях. Здесь необходимо отметить, что радиационная стойкость, вернее ее часть, связанная с движением дислокаций, также будет зависеть от магнитного поля.

Влияние магнитного поля на полимеры исследовалось на промышленных пленках изотропного изотактического полипропилена толщиной 140 мкм с молекулярной массой 300 000 и двусно-ориентированного полиэтилентерефталата толщиной 180 мкм с молекулярной массой 30 000. Испытанию подвергались стандартные образцы в виде лопатки длиной 10 мм и шириной 4,3 мм.

В первой серии экспериментов проводилось растяжение образцов (до разрушения) без магнитного поля и в полях 0,3, 0,5, 0,8 Тл. Полученные результаты отражены на приведенных диаграммах растяжения. На рис. 1 представлена диаграмма, полученная для полипропилена. На рис. 2 начальная часть этой диаграммы представлена в увеличенном масштабе.

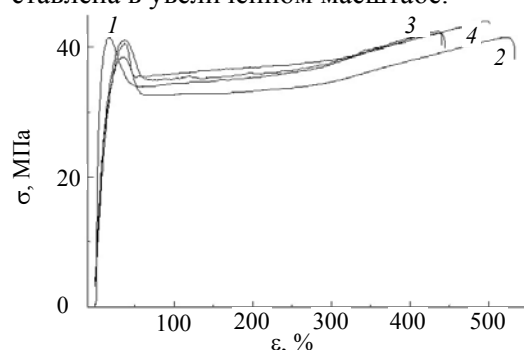


Рис. 1. Растяжение образцов из полипропилена в магнитном поле: 1 — без поля; 2 — 8; 3 — 5; 4 — 3 кЭ

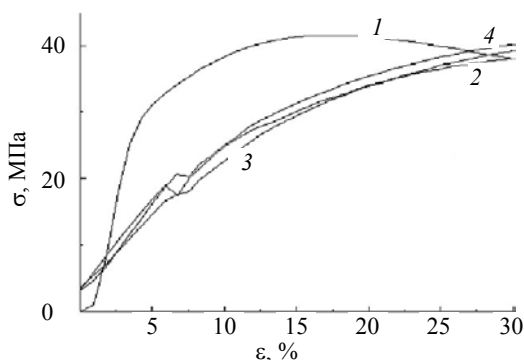


Рис. 2. Растяжение образцов из полипропилена в магнитном поле: 1 — без поля; 2 — 8; 3 — 5; 4 — 3 кЭ. Начальный участок

Здесь было отмечено существенное уменьшение модуля упругости в магнитном поле. Об этом свидетельствует табл. 2, построенная на основании полученных результатов.

Т а б л и ц а 2. Поведение модуля упругости в магнитном поле

Условия испытаний	Модуль, МПа	Максимальное напряжение, МПа	Разрывное удлинение, %
Без поля	860	41,5	435
3 кЭ	300	41,0	500
5 кЭ	260	40,5	435
8 кЭ	310	38,5	525

Таким образом, модуль при растяжении в магнитных полях уменьшается в 2—2,5 раза, причем величина поля не имеет значения.

На рис. 3, 4 (в увеличенном масштабе) приведена диаграмма растяжения, полученная для образцов из полиэтилентерефталата (ПЭТФ).

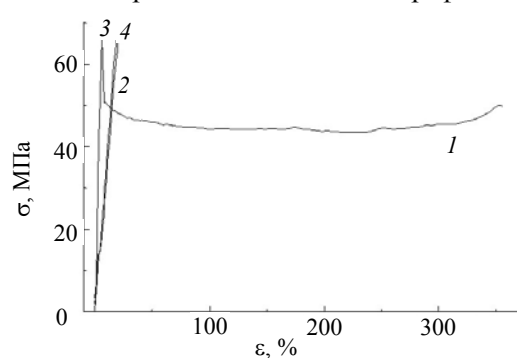


Рис. 3. Растяжение образцов из полиэтилентерефталата в магнитном поле: 1 — без поля; 2 — 8; 3 — 5; 4 — 3 кЭ

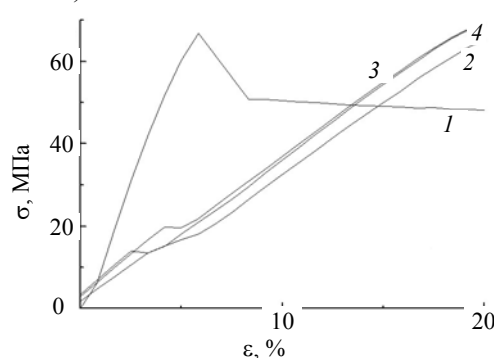


Рис. 4. Растяжение образцов из полиэтилентерефталата в магнитном поле: 1 — без поля; 2 — 8; 3 — 5; 4 — 3 кЭ. Начальный участок

Таким образом, при растяжении ПЭТФ в магнитных полях в 2,5—3 раза уменьшается модуль и значительно уменьшается разрывное удлинение — полимер хрупко разрушается примерно в области предела вынужденной эластичности (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Поведение модуля и разрывного удлинения в магнитном поле

Условия испытаний	Модуль, МПа	Максимальное напряжение, МПа	Разрывное удлинение, %
Без поля	1115	67,0	355
3 кЭ	460	68,5	20
5 кЭ	445	67,5	20
8 кЭ	380	65,0	20

Следует также отметить, что для всех образцов, подвергнутых растяжению в магнитных полях, на диаграмме растяжения в области упругой деформации на начальном участке появляется излом кривой. Этот излом отсутствует при растяжении образцов без приложения магнитных полей.

Помимо растяжения, также был исследован процесс релаксации рассматриваемых полимерных материалов в магнитном поле. На рис. 5, 6 приведены соответствующие кривые релаксации.

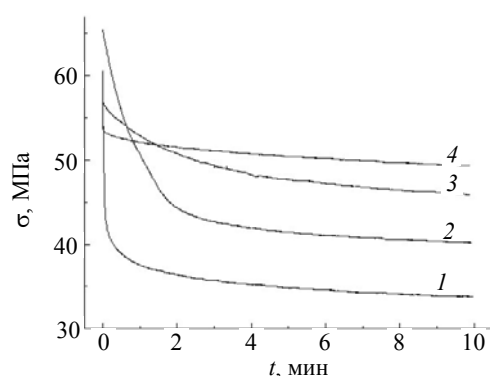


Рис. 5. Кривые релаксации для полиэтилентерефталата: 1 — без поля; 2 — 8; 3 — 5; 4 — 3 кЭ

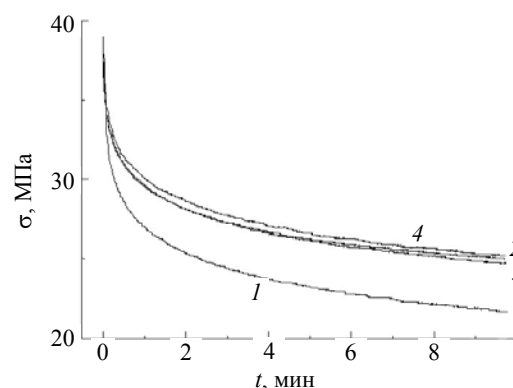


Рис. 6. Кривые релаксации для полипропилена: 1 — без поля; 2 — 8; 3 — 5; 4 — 3 кЭ

Релаксационные кривые снимали на воздухе. Сначала растягивали пленки до 1,5% со скоростью 100%/мин, затем останавливали и в течение 10 мин снимали релаксацию напряжения в полиэтилентерефталате без поля и в полях 3, 5 и 8 кЭ.

Как видно на рис. 5, с увеличением напряженности магнитного поля скорость релаксации в полиэтилентерефталате заметно снижается, а остаточное напряжение в образце увеличивается. В поле с напряженностью 8 кЭ практически отсутствует резкое падение напряжения в образце на начальных временах релаксации.

Образцы из полипропилена растягивали до удлинения 10%, затем снимали релаксацию в течение 10 мин.

Как можно видеть, для полипропилена в магнитных полях также снижается скорость релаксации и возрастает величина остаточного напряжения. Но для полипропилена нет зависимости от величины магнитного поля — релаксационные кривые, полученные в разных по величине магнитных полях, практически совпадают.

В рамках сложившихся представлений о механических свойствах полимеров нам не удалось найти объяснения полученным эффектам. Сначала вызывает удивление, как вообще может быть влияние магнитного поля, когда в материалах изначально нет магнитных моментов. Оказывается, магнитные моменты появляются при деформации.

Эксперименты по измерению электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показали (см., например, [2]), что при растяжении в полимерах появляются магнитные моменты, связанные с радикалами, возникающими при обрыве молекулярных цепочек.

Известно, что энергия взаимодействия атомного магнитного момента с полями, использованными в эксперименте, на два порядка меньше энергии тепловых колебаний, разориентирующих магнитные моменты, и поэтому, на первый взгляд, никакого эффекта от действия магнитного поля не должно быть. Более тщательное рассмотрение этой ситуации показывает, что если учесть слабость взаимодействия спиновой и решеточной подсистем в полимерах и слабое влияние длинноволновых фононов на разориентацию близко расположенных моментов, то влияние магнитного поля не будет определяться соотношением между μH и kT . Моменты, образовавшиеся при разрыве связей, сосредоточены на краях зародышей трещин, и без магнитного поля они ориентированы навстречу друг другу, в результате трещина может схлопнуться назад из-за притяжения между ними. Мы предполагаем, что в магнитном поле моменты ориентируются по полю, параллельно друг другу и, значит, отталкиваются. Это приводит к тому, что в полимере появляются зародыши трещин, которые не могут схлопнуться из-за отталкивания краев, что ведет к уменьшению модуля упругости. Здесь есть аналогия с композитными материалами, однако в нашем случае наполнитель (микротрещины) не более твердый, чем матрица, а гораздо более мягкий. Появление хрупкости (очень значительное уменьшение разрывного удлинения) можно качественно описать, вычисляя полную энергию или объемную и поверхностную энергию трещины. Здесь внешнее поле приводит к увеличению размера трещины поперек напряжения, т.е. к разрыву образца. Таким образом, при предположении, что внешнее поле действует сразу на все моменты в полости (аналог суперпарамагнетизма), удастся качественно объяснить наблюдаемые эффекты:

- для образцов из полиэтилентерефталата наблюдается хрупкое разрушение в магнитном поле, тогда как без поля образцы растягиваются до 300—350%;
- для полимеров наблюдается снижение модуля упругости в магнитном поле примерно в 2,5 раза;
- отмечено замедление релаксационных процессов в магнитном поле.

Таким образом установлено сильное влияние магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов, но необходимы дальнейшие исследования для понимания физических процессов.

Описанные эксперименты важны с прикладной и с технической точки зрения. В первую очередь для крупных термоядерных установок, где в поле более 1 Тл находятся множество элементов конструкции, которые часто испытывают циклические нагрузки. Другая область, где используются сильные магнитные поля, — это крупные детекторы в экспериментах по физике высоких энергий.

Целесообразно провести эксперименты и, возможно, пересмотреть расчеты для материалов и конструкций, используемых в крупнейших установках, таких, как термоядерный реактор ИТЭР и детектор ATLAS для строящегося ускорителя в ЦЕРНе, где магнитные поля 3—5 Тл имеются в большом объеме и рассматриваемый эффект может проявляться еще



Петр Анатольевич Александров, директор ИИТ, зав. лабораторией, доктор ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат премии им. И.В. Курчатова

сильнее. Также целесообразно исследовать радиационную стойкость, а конкретно — ползучесть в магнитном поле.



Владимир Владимирович Бударгин, старший н.с., кандидат ф.-м.н., лауреат Премии им. И.В. Курчатова



Михаил Николаевич Шахов, инженер, лауреат Премии им. И.В. Курчатова



Нина Ивановна Никанорова, старший н.с., кандидат хим.н.



Елена Сергеевна Трофимчук, младший н.с., кандидат хим.н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моргунов Р.Б.** Спиновая микромеханика в физике пластичности. — УФН, 2004, вып. 174(2), с. 131—152.
2. **Регель В.Р., Слущкер А.И., Томашевский Э.Е.** Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. 560 с.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2005 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, вып. 1, с. 24—30.