

УДК 669.017

*Р.Б. Моргунов¹, В.П. Пискорский², Р.А. Валеев², Д.В. Королев²***ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В «НЕМАГНИТНЫХ» МЕТАЛЛАХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87

Дан краткий анализ результатов в области исследования магнитоэластических эффектов – явлений изменения пластичности и прочности металлов под действием магнитного поля. Приведена классификация известных физически обоснованных эффектов на основе термодинамического анализа энергии, сообщаемой системе, и времени релаксации изменений, наведенных магнитным полем. Обсуждаются спорные экспериментальные результаты и их интерпретация. Единые физические механизмы, управляющие магнитоэластичностью, стимулировали возникновение магнитоэластических эффектов одновременно и в немагнитных твердых телах, где магнитное поле также способно вызывать изменения структурночувствительных свойств.

Ключевые слова: магнитоэластичность, термодинамический анализ, предел текучести, твердость, магнитное поле, механические свойства.

*R.B. Morgunov¹, V.P. Piskorskiy², R.A. Valeev², D.V. Korolev²***THERMODYNAMICS ANALYSIS OF MAGNETOPLASTIC EFFECTS IN «NON-MAGNETIC» METALS**

A brief analysis of the results in the study of magnetoplastic effects – the phenomena of changes in the plasticity and strength of metals under the action of a magnetic field is reported. The classification of known and physically justified effects is given on the basis of thermodynamic analysis of the energy reported to the system and the relaxation time of changes induced by the field. Controversial experimental results and their interpretations are discussed. Unified physical mechanisms controlling magnetoplasticity stimulated the discussion of magnetoplastic effects simultaneously in nonmetallic solids, where the magnetic field can also cause changes in structurally sensitive properties.

Keywords: magnetoplasticity, thermodynamic analysis, yield strength, hardness, magnetic field, mechanical properties.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук [The Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences]; e-mail: director@icp.ac.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Возможность управления пластическими свойствами твердых тел и их прочностью с помощью магнитного поля выглядит привлекательным инструментом для решения многих задач материаловедения. В частности, представляется весьма перспективной разработка таких технологий, которые позволяли бы временно уменьшать твердость и предел текучести материала на момент его обработки и изготовления изделий, создавать остаточные изменения коэффициентов ползучести и прочности, изменяемые

в желаемом направлении. Поэтому эксперименты такого рода проводятся давно и многими группами [1, 2], хотя данные, накопленные за несколько десятилетий, нуждаются в осмыслении и в селекции наиболее пригодных для практики экспериментальных ситуаций. Авторам известны более 300 статей о влиянии магнитного поля с индукцией 0,05–30 Тл и длительностью выдержки в магнитном поле от 1 мкс до нескольких суток на механические свойства полимеров, ионных кристаллов, полупроводников, переходных металлов, фуллеритов, технологических сплавов. Лишь отчасти эти статьи упомянуты и перечислены в обзорах [3–7]. Трудно назвать материал, пластичность и прочность которого до настоящего времени не была бы испытана в магнитном поле либо после выдержки материала в магнитном поле. Вместе с тем физические представления о механизмах такого влияния значительно отстают от огромной экспериментальной базы данных, накопленной разными группами. Даже простое осмысление условий экспериментов и сравнение тех опытов, которые были выполнены разными группами ученых, в настоящее время представляется почти нерешаемой задачей из-за вариативности исследуемых материалов, индукции поля и длительности его импульса, моментов включения поля и испытания механических свойств, наличия или отсутствия дополнительных воздействий (электрического тока, света и др.). Авторы данной статьи не ставили перед собой задачу детального анализа всего массива данных. Однако существуют некоторые общие черты и универсальные наблюдения, которые можно применить к очень разным магнитоэластическим эффектам. Например, термодинамические принципы позволяют обобщать даже те явления, физическая природа которых различна с точки зрения энергии, передаваемой полем образцу, обратимости или необратимости произошедших в нем изменений. Поэтому применение термодинамического анализа к магнитоэластическим эффектам в металлах безотносительно их физической природы дает возможность отделить достоверные наблюдения от ошибочных.

В данной статье не рассматриваются случаи, когда в магнитном поле изменяется пластичность и прочность ферромагнетиков, поскольку значительные поперечные силы, действующие на структурные элементы таких материалов, а также сильное изменение свободной энергии ферромагнитных образцов и дефектов структуры в магнитном поле делают эти явления более или менее тривиальными, хотя в этом случае имеются некоторые нерешенные проблемы. Отметим, что в Гренобле существует лаборатория CNRS, в которой закрытыми, стратегическими и секретными являются исследования самых разнообразных явлений в сверхсильных магнитных полях. Аналогичные лаборатории располагаются в США, Японии и других развитых странах – в них проводятся материаловедческие эксперименты по исследованию сложных явлений в магнитных полях. Деформация кристаллов, закипание жидкости и конденсация пара, закалка стали – лишь некоторые примеры явлений, исследуемых в этих лабораториях. Такие явления не относятся к области физики, потому что слишком сложны для математической обработки и достоверно точного выделения какого-либо одного процесса, но именно они представляют интерес для практической работы. К сожалению, авторам данной статьи не известна ни одна лаборатория, оснащенная набором сверхпроводящих магнитов и комбинированных устройств с постоянным полем до 30–40 Тл для систематических экспериментов в РФ. На рис. 1 представлено распределение доли сообщений в научно-технической литературе по величине значений максимального магнитного поля, использованного в экспериментах. В «немагнитных» материалах (в данном случае подразумеваются не ферромагнитные образцы) энергия, передаваемая спине электрона, сопоставима со средней энергией термических флуктуаций $\sim 0,025$ эВ при температуре 300 К (при которой выполнена большая часть экспериментов) в магнитных полях ~ 10 Тл. Следовательно, термодинамически значимые поля, способные существенно изменить

равновесие в электронной подсистеме немагнитного металла и таким образом повлиять на какие-либо его свойства при комнатной температуре, находятся за пределами возможности большинства лабораторий в РФ. Видно, что лишь небольшая доля исследований выполнена в сравнительно высоких магнитных полях (10–30 Тл), в которых зеемановская энергия становится сравнима или даже больше средней энергии термических флуктуаций. Подавляющая доля сообщений о влиянии магнитного поля на пластичность металлов относится к области 0,005–1,5 Тл, достижимой в электромагните. Поэтому анализ, представленный в данной статье, относится к диапазону так называемых «слабых» полей, в которых механизмы изменения пластичности наименее исследованы. Вне поля зрения остаются работы коллективов авторов из Франции [8], Германии [9] и Японии [10], выполненные преимущественно в сильных полях сверхпроводящих магнитов (>10 Тл). Механизмы влияния магнитного поля на пластичность алюминия, стали, кремния и др. достоверно установлены в этих работах и не вызывают сомнений.

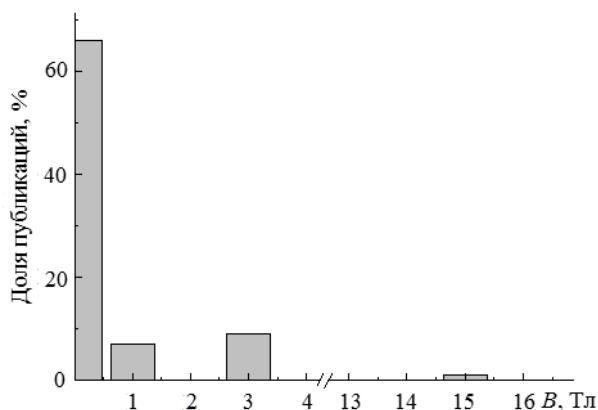


Рис. 1. Доля публикаций, в которых исследовано влияние магнитного поля на пластичность кристаллов (в зависимости от выбранного диапазона поля)

Методика анализа остаточных изменений, вызванных магнитным полем

В большинстве описанных в научно-технической литературе исследований содержится общий анализ изменений значений времени и энергии при магнитопластических эффектах, который основан на том факте, что имеются две фазы (рис. 2, а) длительностью:

- τ_1 – с нарастающими изменениями пластичности (микротвердости, предела текучести, пробега дислокаций и др.);
- τ_2 – с постепенным исчезновением изменений, вызванных магнитным полем после его отклонения.

Эти параметры можно получить из большинства работ по магнитопластичности. Иногда в научных статьях имеются данные лишь об одной из этих фаз, в этом случае используется только одно из доступных значений времени. Для примера на рис. 2, б приведены данные об изменении микротвердости кристалла NaCl:Eu как функции его выдержки в магнитном поле. Отметим, что инициируемые магнитным полем изменения могут исчезать и без отключения магнитного поля, что не позволяет назвать вторую фазу «релаксацией». Это делает непохожей ситуацию на ожидаемое «намагничивание–размагничивание» и свидетельствует о сложных процессах, инициируемых магнитным полем в кристалле. Однако вторая фаза и в этом случае присутствует и принимается во внимание при обработке массива данных.

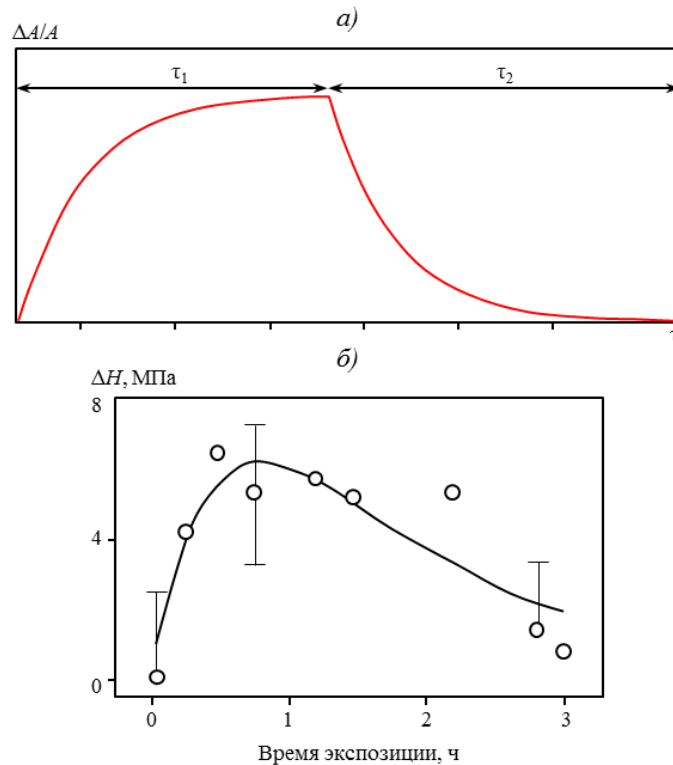


Рис. 2. Схематическая зависимость (а) постепенного изменения пластичности образца в магнитном поле (с постоянной времени τ_1) и релаксации после отключения магнитного поля (с постоянной времени τ_2), а также пример зависимости микротвердости кристаллов NaCl:Eu от времени экспозиции в магнитном поле 1 Тл (б)

Кроме этих длительностей, удобно сравнивать и анализировать относительное изменение пластичности ($\Delta A/A$) материалов во внешнем поле, поскольку эта величина безразмерная и позволяет сравнивать относительное изменение разных характеристик пластичности (микротвердости, внутреннего трения и др.). Возможно этот подход кажется слишком приближенным, поскольку в общем случае не наблюдается линейной зависимости между разными характеристиками пластичности. Например, предел текучести необязательно прямо пропорционален пробегу дислокаций. Однако разумным основанием для этого подхода может служить то обстоятельство, что магнитное поле, как правило, меняет характеристики пластичности на небольшую долю от их абсолютного значения. Так, микротвердость обычно меняется не более чем на 10%, предел текучести – не более чем на 50–70% и т. п. Это позволяет надеяться, что в статистике для большого количества разных экспериментов общая тенденция при наличии взаимосвязи между величинами все же будет сохраняться (см. данные, представленные далее).

Результаты и обсуждение

Зависимость времени перехода материалов в новое состояние от магнитного поля

На рис. 3, а представлена зависимость времени τ_1 , выбранного из научной литературы для разных материалов, от величины магнитного поля B , использованного в этих работах. Видно, что с ростом магнитного поля величина τ_1 закономерно уменьшается. Причем, несмотря на все приближенные допущения и включение в анализ самых разных материалов, эта закономерность совершенно очевидна. Этого и следовало ожидать из общих термодинамических представлений – магнитоиндуцированные процессы

ускоряются с ростом величины магнитного поля. Это становится тем более очевидным при сравнении нескольких точек для одного и того же материала (см. например, NaCl – рис. 3, б). Отметим, что, хотя это утверждение кажется тривиальным, в спиновой химии [7] известно множество случаев, когда зависимость от величины магнитного поля оказывалась немонотонной, что, безусловно, приводит к выпадению точек из основной зависимости рис. 3, б.

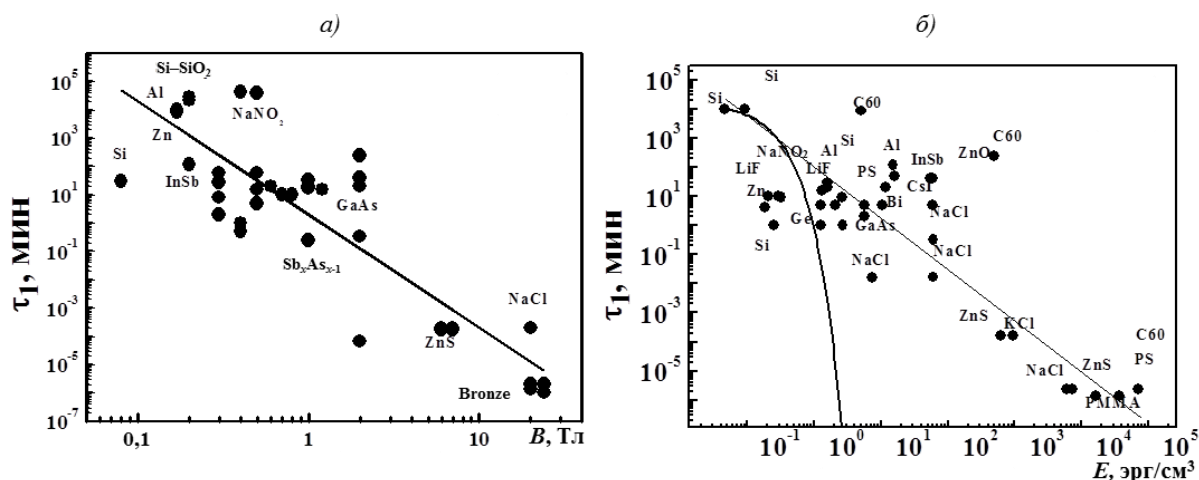


Рис. 3. Зависимости постоянной времени τ_1 от индукции внешнего магнитного поля B (а), а также от энергии магнитного поля E в единице объема в расчете на магнитную восприимчивость данного материала (б). Сплошными линиями показаны аппроксимации степенной и экспоненциальной зависимостей, описанных в тексте

Зависимость произвольной характеристики пластичности от величины магнитного поля, конечно же, отличается в различных материалах и в разных экспериментах. Однако можно предположить, что в большинстве случаев магнитное поле напряженностью H сообщает кристаллической решетке энергию $E = \chi_m H^2 / 2$ на единицу объема, пропорциональную ее объемной магнитной восприимчивости χ_m . Но во многих случаях энергия, передаваемая кристаллической решетке, совсем не обязательно является управляющим параметром процесса, влияющим на пластичность кристаллов. Например, в тех случаях, когда рассматривается влияние величины магнитного поля на реакции между редкими парамагнитными дефектами, магнитная восприимчивость кристаллической матрицы не имеет значения. Однако этот факт будет замечен по отклонениям точек от линии общей закономерности. Поэтому для дальнейшего анализа значения χ_m взяли из таблиц физических величин для соответствующих материалов. На рис. 3, б в двойных логарифмических координатах показана зависимость постоянной времени τ_1 от энергии E , сообщаемой полем единице объема кристаллической решетки. Несмотря на значительный разброс значений, видна тенденция к спрямлению зависимости $\tau_1(E)$, что в двойных логарифмических координатах означает наличие степенной зависимости типа $\tau_1 \approx E^n$. Это может быть объяснено следующим образом. В случае термоактивированных процессов, управляемых магнитным полем, можно ожидать, что время перехода (τ_1) в новое состояние в магнитном поле будет подчиняться зависимости Аррениуса – $\tau_1 \approx \exp(-E/kT)$. В научной литературе встречается мало данных, полученных при температуре, отличной от комнатной. Все данные, представленные на рис. 3, относятся к интервалу температур 280–300 К. Эти данные не укладываются однозначно в экспоненциальную зависимость – пример, которой приведен на рис. 3, б. Однако, поскольку добавка в энергию процессов, связанная с магнитным полем, в «слабых» полях мала, уравнение Аррениуса может быть разложено в ряд по степеням параметра E : $\tau_1 = \tau_0 - \alpha E - \beta E^2$. Этим, вероятно, и объясняется тенденция к спрямлению зависимости $\tau_1(E)$ в

двойных логарифмических координатах. Таким образом, из данных рис. 3 и его анализа можно сделать вывод, что большинство магнитоэластических эффектов (независимо от типа материала) подчиняется простой закономерности уменьшения длительности перехода в новое состояние с ростом магнитного поля и энергии, передаваемой кристаллической решетке. Таким образом, магнитоэластические эффекты, которые подчиняются этой закономерности, можно отнести к «силовым», т. е. к тем, где имеет значение действие магнитной силы на структурные элементы кристалла или дефекты. Другая часть (которая выпадает из общей закономерности), очевидно, характеризуется более тонкими механизмами влияния магнитного поля, не сводящимися к передаче энергии и преодолению потенциальных барьеров – к таким, например, относятся спин-зависимые магнитоэластические эффекты [3–7]. Их можно назвать «несиловыми» эффектами.

Необратимость изменений, вызываемых магнитным полем

Магнитоэластические эффекты, которые сводятся к действию магнитной силы на дефекты структуры и к стимулированию термоактивированного преодоления потенциальных барьеров, очевидно, должны удовлетворять простому известному требованию термодинамики $\tau_1 = \tau_2$. Релаксация нового состояния, возбужденного магнитным полем, должна происходить с той же постоянной времени, что и магнитостимулированный переход в возбужденное состояние. Ожидаемая для таких эффектов зависимость показана на рис. 4 прямой сплошной линией. Так, обнаруживается совсем немного точек, которые попадают в область этой линии. Это свидетельствует о том, что во многих случаях действие магнитного поля на подсистему структурных дефектов оказывается необратимым. В сложной системе, какую представляет собой деформируемый кристалл с дефектами, это вполне ожидаемый результат. Достаточно сравнить обсуждаемые явления с процессами намагничивания и размагничивания ферромагнетика, где, хотя и существует обратимая часть намагниченности, наличие структурных дефектов также часто делает необратимым намагничивание и ведет к так называемым необратимым потерям. Поэтому даже в «силовых» магнитоэластических эффектах трудно ожидать выполнения равенства $\tau_1 = \tau_2$. Более того, имеются полностью необратимые магнитоэластические эффекты (см. пример на рис. 2, б). В этом случае система даже при кажущемся восстановлении ее пластических свойств не возвращается в исходное по свободной энергии состояние. Для «несиловых» магнитоэластических эффектов попытки получить зависимость $\tau_2(B)$ не приводят к успеху – такая зависимость не существует, потому что последующие процессы, запущенные однажды магнитным полем, в дальнейшем уже нечувствительны к его наличию и величине.

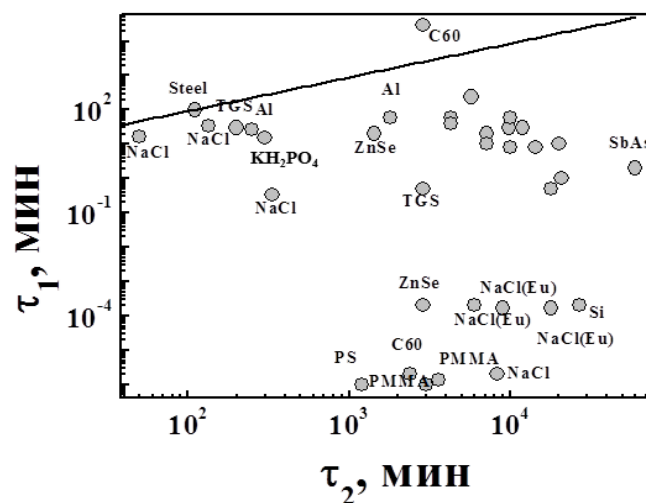


Рис. 4. Зависимость времени перехода в новое состояние τ_1 от времени релаксации из этого состояния τ_2 для магнитоэластических эффектов в различных материалах. Сплошной линией показана зависимость, ожидаемая для термодинамически полностью обратимых процессов

**Зависимость относительной величины магнитоэластичности
от энергии, переданной магнитным полем**

Еще одним, на первый взгляд, тривиальным, но универсальным свойством является то, что время экспозиции материала в магнитном поле τ_1 , как и возрастание передаваемой материалу энергии, увеличивает глубину достигнутых изменений. На рис. 5 приведена зависимость относительного изменения характеристик пластичности $\Delta A/A$ при максимальной экспозиции в магнитном поле от времени этой экспозиции. В статическую обработку включены не только работы, в которых изучались характеристики пластичности (микротвердость, предел текучести и др.), но и те работы, где изменения пластических свойств сопровождались изменением электрических, оптических и других характеристик, использованных авторами для косвенного изучения магнитоэластичности, т. е. принимали, что причиной изменения пластических свойств служили те же процессы, которые влияли и на пластичность. В большинстве случаев на это указывали сами авторы работ.

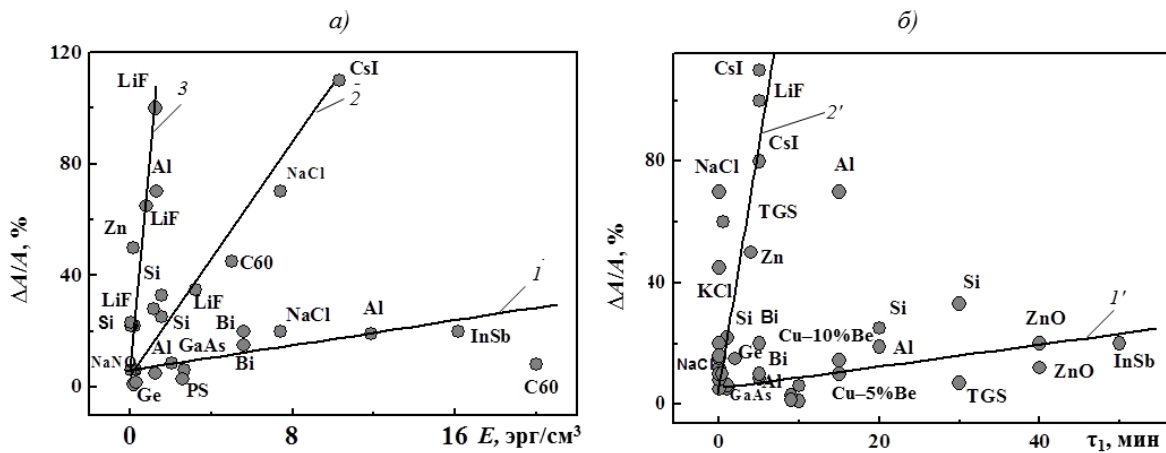


Рис. 5. Зависимости относительной величины изменения пластичности материалов $\Delta A/A$ от магнитной энергии, сообщенной полем единице объема кристаллической решетки E (а), и от времени перехода в магнито возбужденное состояние τ_1 (б) для ряда материалов. Сплошными линиями показаны аппроксимации, описанные в тексте

На рис. 5, а показана зависимость $\Delta A/A$ от величины магнитной энергии, переданной магнитным полем кристаллу. Можно выделить три отдельные группы материалов (1, 2 и 3), которые селекционируют все материалы в три разных разряда. В группе 1, куда входят преимущественно полупроводники и металлы, величина $\Delta A/A$ очень слабо зависит от переданной энергии. Это свидетельствует о том, что значение имеет не ponderomotorная сила и объемная энергия, передаваемая кристаллической решетке, а процессы в подсистеме структурных дефектов, магнитная восприимчивость которых составляет очень маленькую долю от объемной восприимчивости кристаллической матрицы. Поэтому величина наблюдаемого магнитоэластического эффекта в этой группе материалов практически не связана со свойствами кристаллической решетки.

На рис. 5, а показаны еще две группы 2 и 3, в которые входят в основном диэлектрики. Причины, по которым эти материалы образуют две группы, непонятны. Даже один и тот же материал, исследованный разными авторами, попадает в группы 2 и 3. Это может свидетельствовать о том, что в одном и том же материале полевая зависимость магнитоэластического эффекта может быть различна, потому что существует несколько разных механизмов влияния магнитного поля на пластичность кристаллов. Кроме того, упомянутое в начале данной статьи различие методов измерений и непропорциональность между изменениями различных характеристик в магнитном поле также может служить причиной образования двух ветвей 2 и 3. На рис. 5, а показаны линейные аппроксимации

зависимостей $\Delta A/A$ от энергии, переданной магнитным полем, $-E = \chi_m H^2/2$ для всех трех групп. Аппроксимацию осуществляли линейными зависимостями с наклоном B и уровнем A . Получены следующие коэффициенты:

- 1 – $A=6,1 \pm 2,7$, $B=1,1 \pm 0,3$;
- 2 – $A=4,3 \pm 2,9$, $B=10,5 \pm 0,7$;
- 3 – $A=5,9 \pm 1,7$, $B=78,5 \pm 11,2$.

Видно, что по значениям больше всего отличается коэффициент B , который меняется от 1,1 (в первой группе) до 78,5 – в третьей. Отметим, что полевые зависимости для каждого индивидуального материала различны и необязательно линейны. В данном анализе учтена лишь максимальная, указанная авторами величина $\Delta A/A$.

На рис. 5, б показана зависимость $\Delta A/A$ от времени экспозиции τ_1 материала в магнитном поле. На этой зависимости также видны две ветви $1'$ и $2'$. Полупроводники и металлы попадают в ветвь $1'$, в то время как диэлектрики – в ветвь $2'$. Обнаруженное разделение на две ветви может означать, что в проводящих материалах (полупроводниках и металлах) накопление магнитостимулированных свойств со временем происходит существенно иначе, чем в непроводящих (диэлектриках). В частности, обобществленные электроны проводимости могут в значительной степени скрадывать индивидуальность процессов, происходящих в комплексах дефектов, прерывая, например, спиновую поляризацию от одних пар к другим. В диэлектриках механизмы влияния магнитного поля на физические свойства могут сильно различаться. Аппроксимация линейными зависимостями на рис. 5, б снова выявляет, что главным различием ветвей является коэффициент угла наклона B , который равен $0,4 \pm 0,2$ – для ветви $1'$ и $15,9 \pm 1,6$ – для ветви $2'$. Низкое значение коэффициента B в первой ветви свидетельствует о слабой зависимости магнитоэлектрических эффектов в материалах, попавших в эту ветвь, от продолжительности выдержки в магнитном поле. Во многих случаях это явление носит технический характер, означая, что авторы не располагали возможностью для исследования таких эффектов с лучшим временным разрешением, достаточным для обнаружения временной зависимости.

Заключения

Возросший интерес и публикационная активность в области исследования влияния магнитных полей на пластичность материалов позволили собрать значительные статистические данные для общего термодинамического анализа этой группы явлений, независимо от исследуемого материала и конкретной постановки эксперимента. Проведенный анализ приводит к следующим выводам.

– Длительность перехода в новое состояние в магнитном поле для подавляющего количества материалов коррелирует с величиной переданной кристаллической решетке энергии, что прямо указывает на объемный характер магнитных сил, управляющих магнитоэлектричностью, и на зависимость величины эффекта от магнитной восприимчивости решетки. Вместе с тем имеются случаи, когда материалы «не попадают» на линейную зависимость, что может быть обусловлено как тривиальным отклонением продолжительности процесса, стимулированного магнитным полем, в конкретном материале от большинства эффектов, включенных в рассмотрение, так и иными механизмами, для которых важна энергия, переданная дефектам структуры, а не всей кристаллической решетке. В среднем наблюдается степенная зависимость длительности перехода в новое состояние от величины переданной кристаллической решетке энергии.

– Для большинства материалов изменения, инициируемые магнитным полем, приводящие к изменению пластичности, являются необратимыми, что связано с фундаментальной спецификой дефектной подсистемы, которая не возвращается к исходному состоянию после ее возбуждения любыми воздействиями. Для ряда материалов необратимость изменений, инициированных магнитным полем, носит принципиальный

характер и связана с тем, что роль магнитного поля сводится к снятию запретов на релаксацию из метастабильного состояния.

– Величины максимально достижимых магнитоэластических эффектов линейно зависят от времени, различаясь при этом крутизной линейной зависимости – разной для металлов, полупроводников и диэлектриков. К такому же разделению на категории приводит анализ зависимости максимально достижимого относительного эффекта от времени экспозиции в магнитном поле. Этот факт может свидетельствовать о существенной роли носителей заряда в проводящих твердых телах и их значительном влиянии на магнитоэластичность металлов.

Отметим также, что во все проанализированные группы материалов включены только «немагнитные» твердые тела. Представляется важным исследование магнитоэластичности жестких магнитов [11–15], которые стратегически важны [11], но их пластические свойства и влияние на них магнитного поля практически не исследованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Glavatsky I., Glavatska N., Dobrinsky A. et al. Crystal structure and high-temperature magnetoplasticity in the new Ni–Mn–Ga–Cu magnetic shape memory alloys // *Scripta Materialia*. 2007. Vol. 56. Is. 7. P. 565–568.
2. Kistorz G., Müllner P. Basic – magnetoplasticity // *Zeitschrift für Metallkunde*. 2005. Vol. 96. Is. 7. P. 703–709.
3. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. Resonance magnetoplasticity in ultralow magnetic fields // *Dislocations in solids*. Amsterdam: Elsevier, 2008. Vol. 14. Ch. 86. P. 333.
4. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитоэластический эффект: основные свойства и физические механизмы // *Кристаллография*. 2003. Т. 48. №5. С. 826–854.
5. Головин Ю.И. Магнитоэластичность твердых тел (обзор) // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 769–863.
6. Моргунов Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности // *Успехи физических наук*. 2004. № 2. С. 131–153.
7. Buchachenko A.L. MASS-Independent Isotope Effects // *Journal of Physical Chemistry*. В. 2013. Vol. 117. No. 8. P. 2231–2238.
8. Beaunon E. Physical modeling of anisotropic grain growth at high temperature in local strong magnetic force field // *Science Technology of Advanced Materials*. 2008. Vol. 9. P. 356–401.
9. Molodov D.A., Bollmann C., Gottstein G. Impact of a magnetic field on the annealing behavior of cold rolled titanium // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 467. P. 71–80.
10. Yonenaga I., Takahashi K. Effect of magnetic field on dislocation-oxygen impurity interaction in silicon // *Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 101. P. 568–576.
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
12. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2012-0-2-9-11.
13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А. Фазовый состав спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10.
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Чередниченко И.В., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние содержания меди на фазовый состав и магнитные свойства термостабильных спеченных магнитов систем Nd–Dy–Fe–Co–B и Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2. С. 11–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-11-19.
15. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Зависимость свойств спеченных материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B от технологических параметров // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 24–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-24-29.