НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля

09, сентябрь 2012

DOI: 10.7463/0912.0454270

Комшина А. В., Помельникова А. С.

УДК 621.789

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

fraulein@list.ru

pomelnikovalla@rambler.ru

Введение

Повышение конкурентоспособности, надежности и долговечности различных видов машин и механизмов является актуальной задачей современной промышленности. Успешное её решение базируется на комплексных исследованиях, связанных с разработкой и применением в производстве технологических методов, позволяющих целенаправленно формировать структуру с заданными физико-химическими, механическими и триботехническими свойствами. Значительная часть этих методов связана с применением воздействий полей различной природы.

Цель данной статьи - анализ научной информации о проведенных теоретических и экспериментальных исследованиях в области модификации различных материалов с помощью магнитных полей.

В статье представлен обзор работ, посвященных изучению влияния магнитных полей различной напряженности на структуру и свойства материалов. Актуальность исследований в этом направлении обусловлена сложностью и недостаточной изученностью механизмов и эффектов, сопровождающих процессы модификации. В связи с этим, детальное изучение достигнутых на сегодняшний день результатов в этой области необходимо для выбора и обоснования способов и режимов модификации материалов.

1 О физической природе влияния магнитных полей на свойства материала

Исследования последних лет в области магнитополевых воздействий подтверждают, что с помощью умеренных магнитных полей возможно прямое

бесконтактное воздействие на динамику структурных дефектов различного уровня, влияние на их поведение и, как следствие, изменение макросвойств материала и эксплуатационных свойств изделия.

Отмечается [1], что обработка в электромагнитных полях (ЭМП) отличается низкими затратами энергии. Так, например, типичные значения энергии, сообщаемые одному атому в кристаллической решетке с параметром a в обычно используемых полях составляют по порядку величины: в магнитном поле (МП) $B = 1\ Тл$, $\Delta W \approx \mu_B B \approx 10^{-4}\ эВ$, в электрическом поле (ЭП) $E = 1 кВ/см$, $\Delta W \approx eEa \approx 10^{-4}\ эВ$, в поле импульсного тока $j = 10^3\ A/мм^2$ длительностью $\tau = 100 мкс$ $\Delta W \approx j^2 \rho \tau a^3 \approx 10^{-4}\ эВ$, в силовом поле при деформации $\varepsilon = 1\%$ $\Delta W \approx E' \varepsilon^2 a^3 / 2 \approx 10^{-3}\ эВ$ и тепловом при $\Delta T = 100 K$, $\Delta W \approx kT \approx 10^{-2}\ эВ$.

Здесь μ_B – магнетон Бора, е – элементарный заряд, ρ – удельное сопротивление, k – постоянная Больцмана, E – энергия, E' – модуль Юнга.

В любом реальном кристалле дефекты понижают степень симметрии решетки, локально перераспределяют электронную плотность, что вызывает появление дальнодействующих макроскопических электрических и магнитных полей [1].

На рис. 1 показаны возможные причины влияния ЭМП на отдельные элементы структуры и структурные уровни. Например, в идеальном кристалле ЭП и МП могут вызвать упорядочение по дипольным и магнитным моментам, изменение электронного и фононного спектра, а также фазовые переходы. Что касается точечных дефектов, то, хотя сами по себе они редко являются причиной разрушения материала, важным фактором является их взаимодействие с дислокациями. Например, если у дефекта существует дипольный или магнитный момент и упругая анизотропия, то его ориентация в ЭП и МП вызовет снижение напряжения течения в одних плоскостях и увеличение в других. В металлах же изменение в ЭП и МП состояния электронного газа (который можно рассматривать как совокупность точечных стопоров для дислокаций) способно оказать влияние на пластические свойства из-за эффекта электронно-дислокационного взаимодействия.

Характер взаимодействия дислокаций с полями зависит от природы поля: ЭП может оказывать силовое действие на заряженные ядра дислокаций, а неоднородное

МП – на обладающие магнитным моментом [1]. Дислокации в различных кристаллах (ионных, ковалентных, металлических) обуславливают повышенную магнитную восприимчивость. Отмечается [1] возможность протекания спин-зависимых реакций между дефектами и отдельными атомами внутри ядер дислокаций и точечных комплексов. МП меняет мультиплетность состояний образующихся и диссоциирующих пар, то есть статистику этих состояний в кристалле.

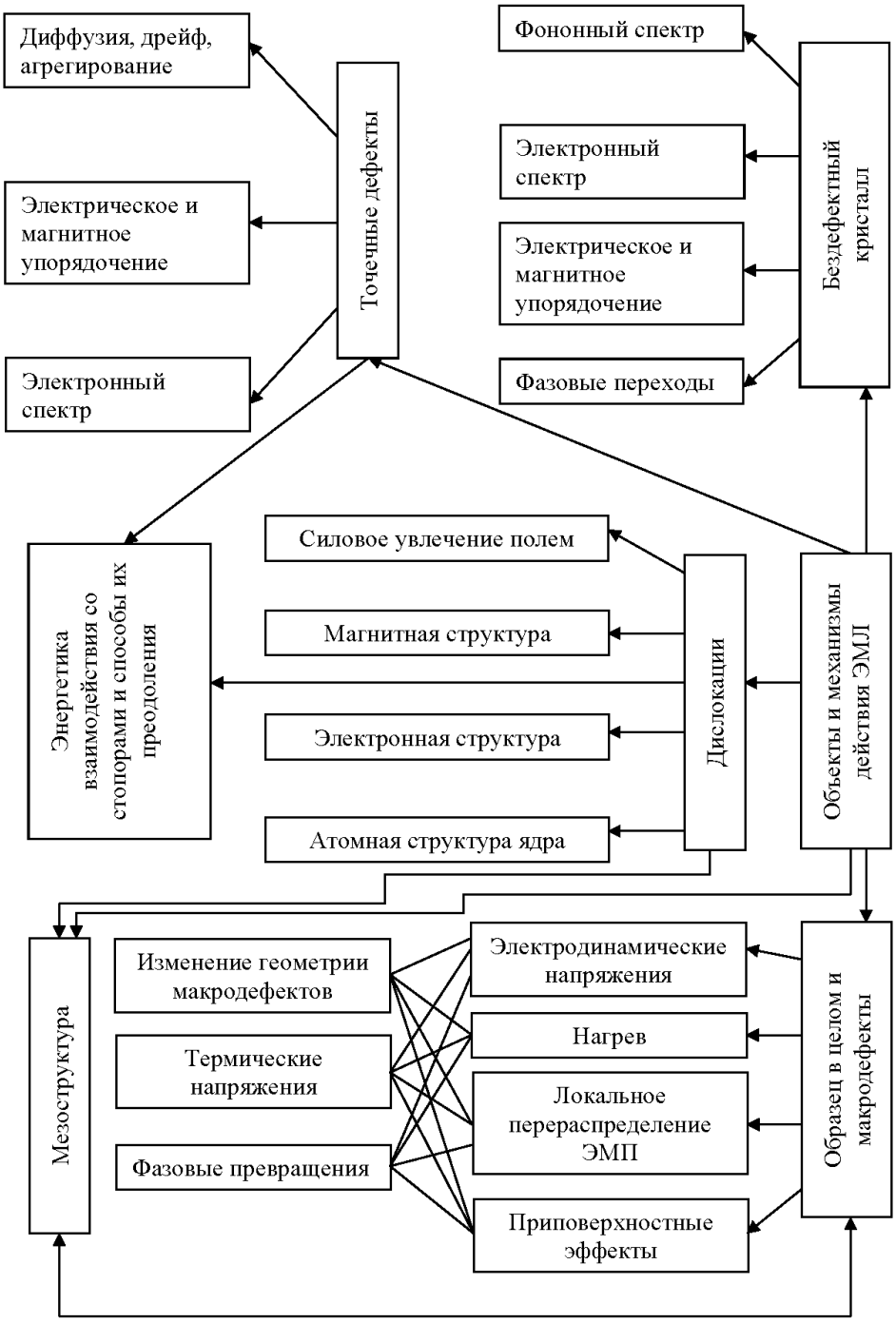

Рисунок 1 – Анализ влияния ЭМП на структуру и свойства кристалла

Что касается действия ЭМП на макродефекты и образец в целом, то разница плотностей энергии ЭМП в соседних элементарных объемах образца или на поверхности вызывает появление электродинамических усилий, а протекающий ток – разогрев, что ведет к появлению термических напряжений.

Остановимся подробнее на магнитопластических эффектах, впервые обнаруженных в 1987 г. группой ученых под руководством профессора В.И. Альшица [2], установившей явление перемещения дислокаций под действием постоянного магнитного поля в кристаллах NaCl в отсутствии механических напряжений. Дальнейшие исследования в этой области показали, что магнитопластический эффект приводит к снижению предела текучести, уменьшению микротвердости и внутреннего трения различных монокристаллических материалов.

Согласно [3], магнитопластические эффекты (МПЭ) можно разделить на три группы касательно временных характеристик: те, что проявляются во время воздействия МП, а также обратимые и необратимые эффекты, которые имеют длительное последействие (рис. 2). Предполагается, что неравновесность кристалла обеспечивает высокую чувствительность дефектной структуры к воздействию внешних и внутренних МП.

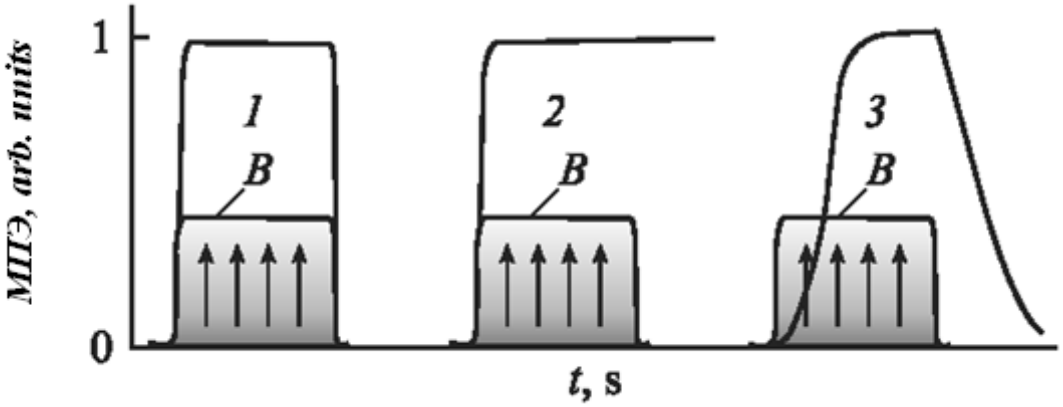

Рисунок 2 – Три основных типа поведения немагнитных материалов в МП: 1 – эффекты возникающие под действием МП, 2 – необратимые постэффекты, 3 – последействие с медленной релаксацией

В работах [2, 4–6] проводили исследования влияния слабого постоянного МП (слабое МП из условия $\mu_B B << kT$, а для металлов добавляется еще условие $\omega = Be/m << \omega_c$ (μ_B – магнетон Бора, B – индукция МП, k – постоянная Больцмана,

ω – циклотронная частота, e и m – заряд и масса электрона, ω_c – частота столкновения электрона с рассеивающими центрами)) на механические свойства различных немагнитных кристаллов (NaCl, CsI и др.), а также металлов (Zn, Al). В опытах с немагнитными кристаллами наблюдали инициирование движения дислокаций магнитным полем с B = 0,1…1,6 Тл без приложения дополнительного механического нагружения. Отмечается, что с увеличением времени экспозиции образцов в МП средняя длина пробега дислокаций *L* росла линейно, а при изменении температуры длина пробега *L* практически не менялась. При перемене знака поля на обратный, направление движения дислокаций не менялось, благодаря чему авторы исключили возможность объяснения эффекта действием пондермоторных сил или вихревого электрического поля. Доказано [6], что МП понижает высоту потенциальных барьеров для движения дислокаций, а движущей силой для транспорта дислокаций является случайная мозаика полей внутренних напряжений. Предполагается, что МП влияет на взаимодействие движущихся дислокаций с примесными центрами и на внутреннюю структуру тех и других. Анализ зависимости средней скорости движения краевых дислокаций от пройденного расстояния в кристаллах NaCl, необработанных и обработанных в МП, показал, что МП индуцировало эффект последействия: облегчало движение дислокаций после отключения поля.

Исследование влияния МП с B = 0,2 Тл, которое прикладывали при внедрении индентора в кристаллы висмута, показало, что наблюдается рост микротвердости и уменьшение размеров двойниковых прослоек вокруг отпечатка [7].

Противоположные результаты получены на алюминии [8], установлено, что выдержка в магнитном поле снижает микротвердость алюминия, при этом существует пороговое значение индукции постоянного магнитного поля, начиная с которого наблюдается эффект линейного снижения микротвердости. Обнаружено, что ползучесть в условиях внешнего магнитного поля приводит к уменьшению среднего размера ямок вязкого излома более чем в 2 раза и способствует увеличению скалярной плотности дислокаций, формирующих субструктуру дислокационного хаоса. Это говорит о росте степени закрепления дислокаций и увеличении прочности материала.

Таким образом, влияние магнитного поля на диамагнитные материалы сводится к следующему [3]:

1. МП влияет на неупругие и пластические свойства твердых тел различной природы на всех структурных уровнях и степенях деформации (от 10^{-5} до 1).

2. Существует пороговый характер постэффектов влияния МП и насыщение МПЭ по магнитному полю, что косвенно свидетельствует о селективном влиянии на определенные дефекты в кристалле, т.е. МП особым образом меняет соотношение факторов, влияющих на физико-механические свойства.
3. МПЭ возникает в неравновесных структурах.
4. Существует несколько каналов влияния МП на структуру и свойства материала. Предполагается, что МП индуцирует многостадийные процессы релаксации дефектной структуры. Часть этих процессов (депиннинг дислокаций, распад примесных комплексов и последующая рекомбинация продуктов распада на других дефектах структуры и между собой) носит уникальный характер и не может быть инициируема такими традиционными воздействиями как термическая обработка, механическое воздействие и др.
5. Сильное и слабое МП действует на различные объекты в кристалле.

2 Влияние обработки в МП и комбинированной обработки на свойства материалов

К методам обработки в постоянном МП относятся следующие:

- Обработка одним импульсом с последующим размагничиванием через 8-24 ч;
- Обработка направленной (локальной) концентрацией магнитного потока на заготовку;
- Динамическая обработка , когда деталь в поле постоянной напряженности вращается с некоторым ускорением частоты вращения (1-50 с) в течение 1-5 мин;
- Обработка без последующего размагниченности;
- Обработка при свободном перемещении заготовки в полости индуктора;
- Обработка детали при свободном перемещении в непосредственной близости от полости индуктора.

Различают следующие методы обработки в импульсном магнитном поле:

- Обработка без последующего размагничивания;
- Многоцикловая обработка (2-10 циклов) с выдержкой между циклами 1-20 мин;
- Обработка с применением ферромагнитных сердечников и локальных концентраторов магнитного поля;

- Обработка в металлических контейнерах или камерах с применением феррожидкостей;
- Комбинированные методы.

В 50 – 60-х г.г. появился ряд статей [9-12], в которых речь шла о различных видах обработки в магнитном поле, приводящих к повышению прочности стали. Среди них стоит особенно отметить работы М.Л. Бернштейна [9]. Целью этих исследований являлось повышение свойств сталей с помощью термомеханико-магнитной обработки. В работах показана возможность повышения механических свойств сталей при термической или термомеханической обработке в постоянных и переменных магнитных полях напряженностью до 10000 Э (0,8 МА/м). Однако отмеченное влияние магнитного поля на фазовый состав, структуру и механические свойства закалённой стали оказалось небольшим и в некоторых случаях могло быть отнесено за счёт случайных отклонений в условиях проведения опыта.

Влияние МП на фазовые превращения оказалось возможным для материалов, где имеется хотя бы одна ферромагнитная фаза, участвующая в превращении. Проведенный М.А. Кривоглазом и В.Д. Садовским термодинамический анализ влияния МП на фазовые переходы первого рода [12] показал наличие смещения температуры фазового равновесия T_0. Утверждается, что это происходит за счет того, что под действием МП разность термодинамических потенциалов ферромагнитной и неферромагнитной фаз увеличивается. Величина смещения температуры фазового равновесия в магнитном поле определяется по формуле Кривоглаза-Садовского, аналогичной обобщенной формуле Клайперона-Клаузиуса для смещения температуры фазового равновесия под влиянием давления:

$$\Delta T = \Delta M H T_0 / q \text{, или } dT = T_0 (M_1 V_1 - M_2 V_2) dH / q, \qquad (1)$$

где ΔM – разность магнитных моментов M_1 и M_2 фаз, участвующих в превращении; V_1, V_2 – объемы первой и второй фазы; H – напряженность магнитного поля; T_0 – температура фазового равновесия; q – теплота превращения.

По мнению авторов, повышение напряженности магнитного поля способствует образованию фазы с более высокой намагниченностью и расширяет область ее существования аналогично тому, как уменьшение давления способствует фазовому переходу, сопровождающемуся увеличением объема (рис. 3).

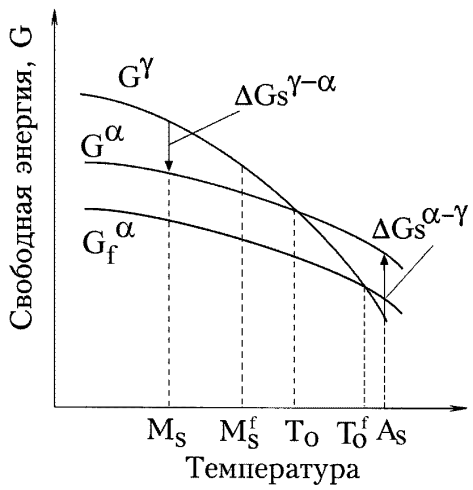

Рисунок 3 – Зависимость свободных энергий аустенита (G^{γ}) мартенсита (G^{α}) от температуры и магнитного поля: M_S – мартенситная точка; $M_S{}^f$ – мартенситная точка в магнитном поле; $G_{\alpha}{}^f$ – свободная энергия мартенсита в магнитном поле

Подобное явление особенно отчетливо наблюдается в распадающихся твердых растворах, имеющих значительную концентрацию парамагнитной компоненты. Действительно, стимулирующее действие магнитного поля на фазовые превращения было обнаружено в сталях и железо-марганцевых сплавах. Однако структурные превращения подобного рода могли наблюдаться лишь в сильных магнитных полях (Н = 10^5 Э).

Важным является экспериментально обнаруженное инициирующее действие МП на мартенситное превращение в сплавах с разной кинетикой. В сплавах с изотермической кинетикой мартенситного превращения, импульсные магнитные поля практически не оказывают влияния на изотермическое превращение, но могут вызвать ярко выраженное атермическое превращение. Это явление заключается в том, что достаточно сильное магнитное поле вызывает структурный переход γ-фазы (аустенита) в α -фазу (мартенсит) при температурах на десятки и сотни градусов выше мартенситной точки (M_H). Появляется возможность разработки принципиально новых способов повышения механических свойств изделий на основе использования как постоянных, так и переменных (или импульсных) магнитных полей.

Например, в сплавах типа Fe-24%Ni-4%Mn (Н24Г4) под влиянием импульсного магнитного поля (ИМП) реализуется мартенситное превращение атермического типа при температурах жидкого азота и выше. При этом постоянное МП может оказывать влияние на развитие изотермического мартенситного превращения, что выражается в сдвиге С-образной диаграммы изотермичсекого мартенситного превращения в сторону

более высоких температур. Таким образом, в сплавах с высокой степенью стабильности аустенитного состояния при охлаждении до низких температур под воздействием магнитного поля возможно развитие мартенситного превращения и изменение физико-механических свойств.

В работе [13] установлено, что МП может оказывать влияние на струтурные характеристики: в сплавах Fe-Ni-C (Н32, 25Н31, 50ХН23) под действием магнитного поля происходит образование мартенсита иного типа по сравнению с тем, что образуется при охлаждении, что связывают с иной кинетикой превращения. В случае превращения под действием МП имеет место постепенное снижение температуры в отличие от классического мартенситного превращения, где образование мартенсита сопровождается «взрывной» кинетикой, при которой сразу образуется большое количество мартенсита.

Некоторое влияние на скорость мартенситного превращения могут оказывать ближний порядок и магнитное состояние в аустенитной фазе. Так, например, в антиферромагнитных аустенитных сталях имеются малые области с ферромагнитным порядком (т. е. что эти стали являются суперпарамагнетиками). Полагают, что данные области являются местами зарождения мартенситной фазы. Таким образом объясняется существенное влияние пластической деформации на зависимость температуры M_H от внешнего магнитного поля.

О влиянии магнитострикции на изменение свойств металлов под действием МП можно сказать, что магнитострикционные эффекты следует учитывать в том случае, если стрикционное изменение объема в поле Н аномально велико. Тогда сдвиг точки перехода можно связать не только изменением магнитной энергии, но и со стрикционными эффектами.

Исследование влияния термомагнитной обработки в сверхсильных полях инструментальных сталей и сплавов (Н19ТЮ, Р18 и др.) показало [14], что после термомагнитной обработки происходит перераспределение легирующих элементов и обеднение матрицы.

С другой стороны на свойства стальных сплавов можно влиять не только с помощью сверхсильных полей, но и используя сравнительно слабые МП (100 – 2000 КА/м) [15]. На рис. 4 показано, как магнитная проницаемость и относительная износостойкость инструментальной стали Р6М5 зависит от напряженности поля соленоида при магнитно-импульсной обработке (МИО).

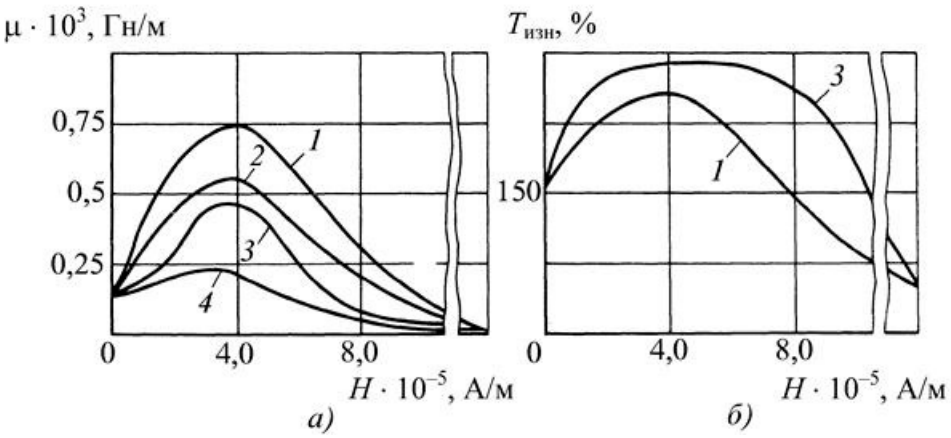

Рисунок 4 – Зависимость магнитной проницаемости μ (а) и относительной износостойкости $T_{изн}$ (б) образцов из стали Р6М5 от напряженности поля соленоида при МИО с длительностью импульса 0,6 с: 1 – t=20 °С; 2 – t=120 °С; 3 – t=320 °С; 4 – t=520 °С [15]

Как видно из приведенных на рис. 4 данных, для указанной марки стали максимальный эффект от МИО наступает при напряженности магнитного поля Н=400 кА/м. ИМП, взаимодействуя с материалом, изменяет его тепловые и электромагнитные свойства, улучшает структуру и эксплуатационные характеристики. На рис. 5 показано изменение физико-механических и технологических свойств образцов из стали 45Х после МИО [15]. Видно, что с увеличением напряженности ЭМП, физико-механические показатели возрастают. Характер изменения технологических свойств различен.

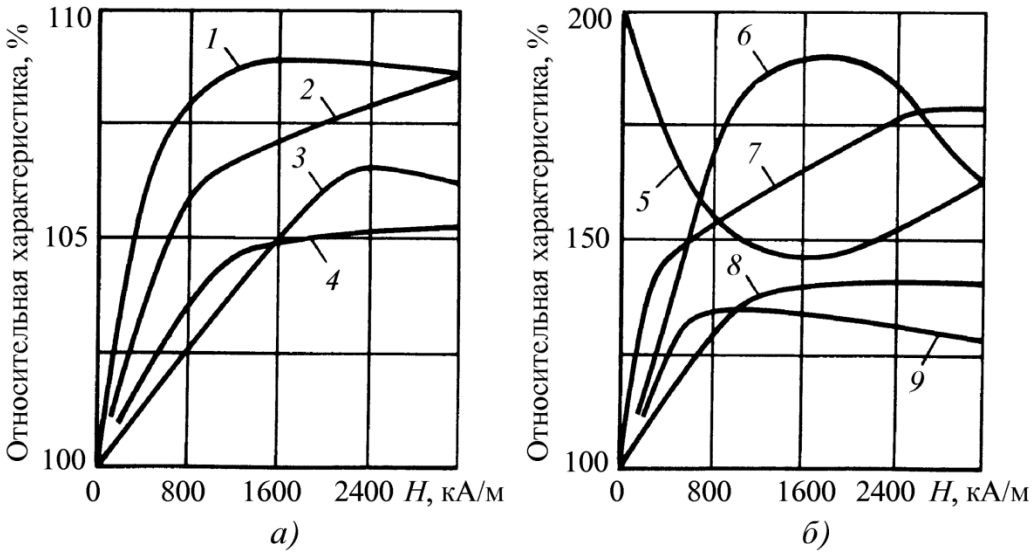

Рисунок 5 – Относительное изменение физико-химических (а) и технологических (б) характеристик образцов стали 45Х после МИО: 1 – теплопроводность, 2 – магнитная проницаемость, 3 – электропроводность, 4 – коррозионная стойкость, 5 – износостойкость, 6 – притираемость, 7 – прокатываемость, 8 – скорость охлаждения, 9 – обрабатываемость резанием.

На рис. 6 представлены результаты измерения микротвердости по длине образцов из стали Р6М5, У12А и сплава Т15К6 [15] без обработки и после МИО. Видно, что после воздействия ИМП показатели твердости выравниваются, т.е. структура становится более однородной.

Испытания на стойкость сверл из стали Р18, обработанных в полях напряженностью 12 МА/м во время закалки, улучшения и отпуска, показали, что долговечность инструмента повышается в 1,2-1,3 раза. Полученные результаты авторы [15] связывают с влиянием термомагнитной обработки на процессы структурных и субструктурных изменений при фазовых переходах под воздействием МП.

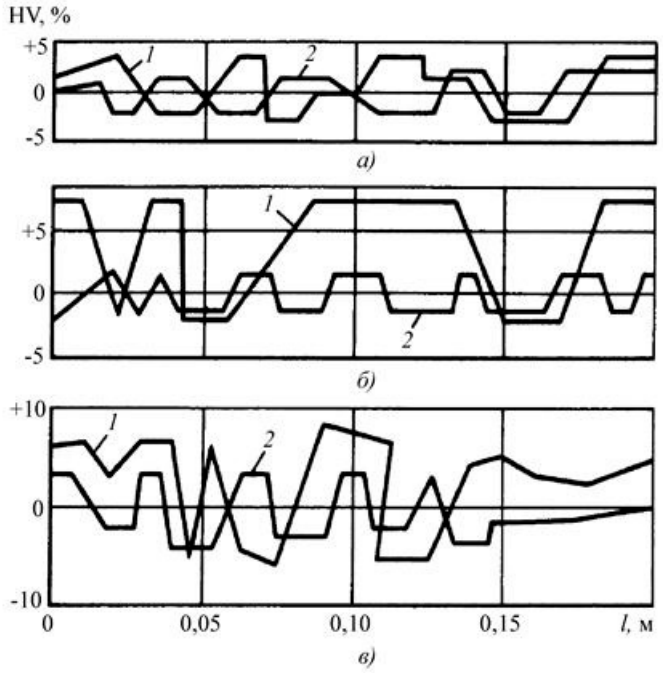

Рисунок 6 – Изменение твердости по длине образца без МИО (1) и после МИО (2) полем напряженностью 450 кА/м с длительностью импульса 0,6с; выдержка после МИО 24 ч: а – сверло диаметром 24,5 мм, сталь Р6М5; б – пластина проходного резца, твердый сплав Т15К6; в – лезвие ножа гильотинных ножниц, сталь У12А.

По результатам работы [16] МИО позволяет увеличить ресурс деталей в среднем на 20…30 % относительно необработанных деталей, при это свойства сохраняются до полного износа деталей. На рис. 7 приведены данные о влиянии числа импульсов магнитного поля на стойкость деталей.

Из рис. 7 видно, что увеличение напряженности магнитного поля и числа импульсов ведет к росту стойкости коронок: максимальный эффект увеличения стоимости инструмента достигается при H=$1{,}6 \cdot 10^6$ А/м и числе импульсов поля 40-50.

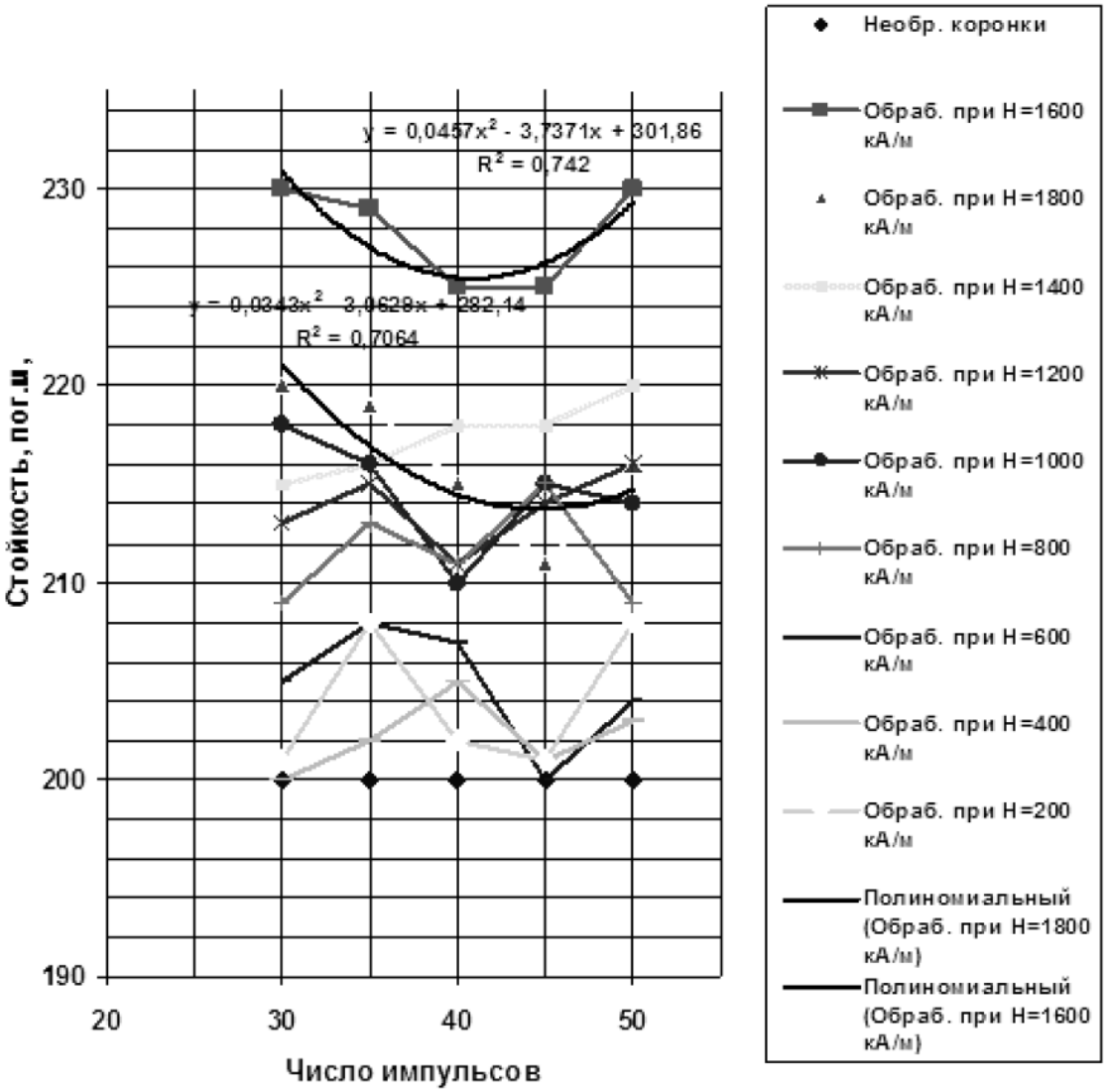

Рисунок 7 – Зависимость стойкость экспериментальных штыревых буровых коронок от числа импульсов магнитного поля

Анализируя описанные результаты, можно заключить, что существует некие диапазоны значений параметров МП для различных материалов, в которых достигается максимальный эффект воздействия МП. Например, если на сталь Р6М5 наибольшее влияние оказывает МП напряженностью Н=400кА/м, то для стали 45Х это значение уже составляет 800кА/м и выше.

Приведенные в работе [17] результаты экспериментальной зависимости напряженности магнитного поля Н и микротвердости HV образцов стали Р6М5 от глубины слоя (рис. 8а) и зависимости микротвердости от напряженности импульса магнитного поля (рис. 8б) показывают, что максимальная микротвердость образцов достигается при напряженности поля $1{,}2 \cdot 10^6$ А/м.

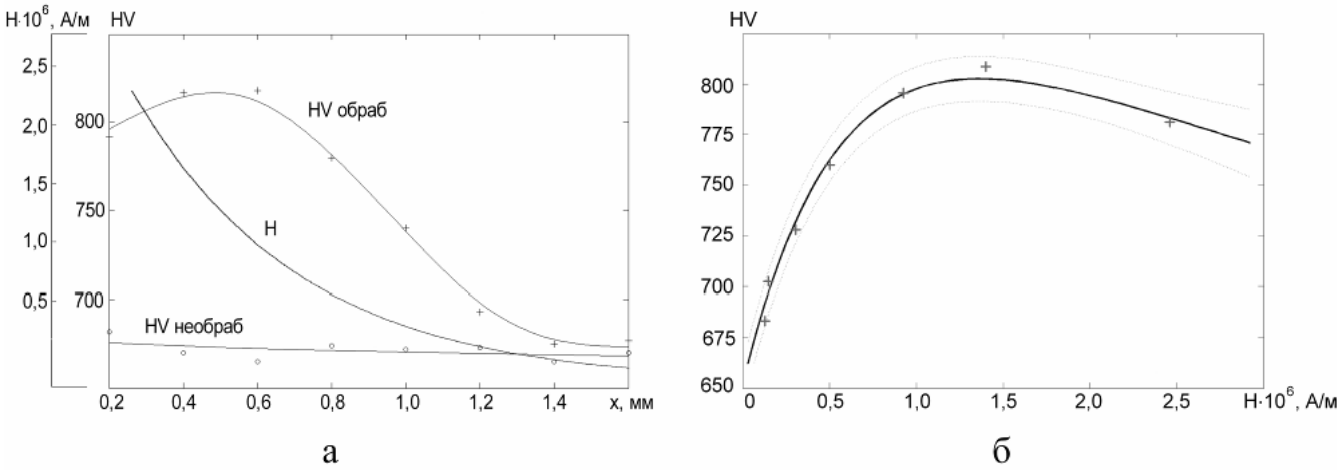

Рисунок 8 – а) распределение *H* и *HV* по глубине *x;* б)зависимость *HV* от *H*

Анализ результатов работ [16, 17] позволяет заключить, что максимальный уровень свойств для инструментальных сталей достигается в узком диапазоне значений H=(1,2...1,6)$\cdot 10^6$ кА/м.

В работе [18] приведены результаты исследования влияния импульсного МП напряженностью до 100 кА/м на микротвердость сплава сендаст и титанового сплава ВТ23. Обнаружен прирост микротвердости обработанных образцов по сравнению с необработанными до 35 и 45 %, соответственно для сплава сендаст и ВТ23.

Авторы [19] приводят результаты влияния импульсного магнитного поля на механические свойства инструментальных и пружинных сталей. В табл. 1 представлены результаты изменения значений микротвердости термоупрочненной быстрорежущей стали Р6М5.

Таблица 1

Микротвердость образцов стали Р6М5 после ТО и МИО (частота МИО: 1 - 0.5 Гц, 2 – 1 Гц, 3 – 5 Гц, 4 – 10 Гц, время обработки 4 мин., напряженность магнитного поля 42 МА/м) [19]

№	Среднее значение микротвердости в образце до/после МИО, МПа	Максимальный разброс средних значений
1	6210/7758	172/77
2	5944/7985	106/102
3	6200/8525	234/85
4	6727/9285	172/72

Из табл. 1 видно, что микротвердость после МИО увеличилась на 25-35 %. Также уменьшение разброса значений микротвердости свидетельствует об увеличении однородности структуры стали. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными авторами работ [16-18].

Характер изменения микроструктуры стали Р18 после МИО представлен в табл. 2

Таблица 2

Микроструктура стали Р18 после МИО

Микроструктура	Без МИО	МИО, 5 Гц, 4 мин., 42 МА/м	МИО, 10 Гц, 4 мин., 42 МА/м
Балл мартенсита	3-4	3-4	3-4
Балл зерна аустенита	10	10(11)	10(11)
Карбидная неоднородность	2-3	1	1
Остаточный аустенит, %	1,8	1,2	1,2

Данные в табл. 2 свидетельствуют об уменьшении количества остаточного аустенита после МИО.

Изменение микротвердости образцов из сталей 65Г и У10А, прошедших термическую и магнитно–импульсную обработку, имеет следующий характер:

– Микротвердость при отпуске в интервале 100 – 200 °С снижается: у стали 65Г от 8373,8 МПа (у закаленного образца) до 7302,7 МПа, 6665,7 МПа, 6152,2 МПа; у стали У10А - от 8961,3 МПа (у закаленного образца) до 8236,0 МПа, 6286,2 МПа, 6065,3 МПа при отпуске на 100, 150 и 200 °С, соответственно;

– МИО при малых частотах вызывает разупрочнение металла, аналогично низкому отпуску: микротвердость стали 65Г снижается до 7302,7 МПа, стали У10А до 7970,3 МПа. При повышении частоты (выше 1 Гц) наблюдается увеличение микротвердости до 9117,8 МПа у стали 65Г и до 7535,4 МПа у стали У10А.

Авторы [19] также провели исследование влияния МИО на содержание углерода в мартенситной закаленной стали 65Г после 4, 8 и 12 часов выдержки, результаты рентгеноструктурного анализа представлены на рис. 9.

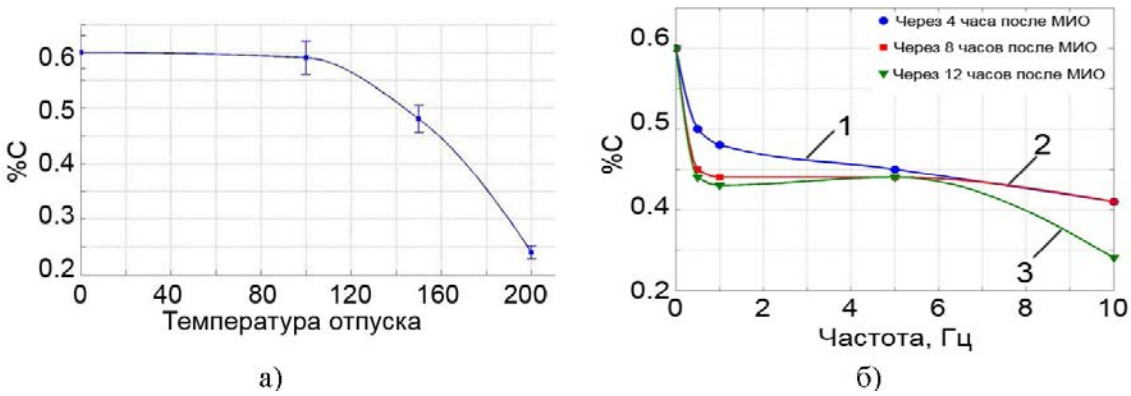

Рисунок 9 – Зависимость содержания углерода в мартенсите: а) – от температуры низкого отпуска; б) – от режимов МИО: 1 – через 4 ч после МИО, 2 – через 8 ч, 3 – через 12 ч

Как видно из рис. 9, сразу после МИО количество углерода снижается от 0,6 % до 0, 5% (частота 0,5 Гц), до 0,41 % (частота 10 Гц), а уже после 12 часов выдержки количество углерода снижается до 0,34 %.

Результаты исследования зависимости нагрузки образования трещин в стали У10А (от отпечатка на твердомере Виккерса) и твердости от режимов отпуска и МИО представлены в табл. 3-5

Таблица 3

Твердость по Виккерсу стали У10А после термической обработки

Режим обработки	Твердость, HV
Закалка, 850°С вода	882,5
Закалка, 850°С вода + отпуск 150°С	880,0
Закалка, 850°С вода + отпуск 200°С	805,7

Таблица 4

Величина нагрузки образования трещин в стали У10А после термической обработки и МИО

Режим обработки	Нагрузка, Н	Наличие трещин
Закалка, 850°С вода	460	Есть
Закалка, 850°С вода + отпуск 150°С	Более 1185	Нет
Закалка, 850°С вода + отпуск 200°С	Более 1185	Нет
МИО 0,5 Гц, 4 мин., 42МА/м	931	Есть
МИО 1 Гц, 4 мин., 42МА/м	1033	Есть
МИО 5 Гц, 4 мин., 42МА/м	613	Есть
МИО 10 Гц, 4 мин., 42МА/	1033	Есть

Таблица 5

Твердость по Виккерсу стали У10А после МИО

Режим	Время после МИО			
	сразу	Через 4 ч	Через 8 ч	Через 12 ч
0,5 Гц, 4 мин., 42МА/м	840,0	868,0	926,0	927,0
1 Гц, 4 мин., 42МА/м	854,3	897,0	926,0	926,0
5 Гц, 4 мин., 42МА/м	882,5	926,0	913,0	926,0
10 Гц, 4 мин., 42МА/м	882,5	882,5	913,0	926,0

Из табл. 4-6 видно, что при указанных режимах МИО в инструментальной стали У10А повышается твердость, при этом также растет нагрузка образования трещин.

Данные, полученные авторами [20] согласуются с описанными выше [19] результатами: после МИО с энергией импульса $\sim 6 \cdot 10^3$ Дж средние значения микротвердости образцов из стали ШХ15 увеличились на 40-50 % при глубине упрочненного слоя 80-100 мкм [20]. Прочность на разрушение повысилась на 20 %.

По мнению авторов [20], интенсивность взаимодействия магнитного импульсного поля с веществом зависит от степени структурной и энергетической неоднородности материала. Полагают, что вокруг кристаллов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла происходит концентрация микровихрей магнитного поля, и, как следствие, нагрев этих участков, что ведет к выравниванию структуры, изменению физических и механических свойств металла.

Полученные в [19] результаты согласуются с полученными нами результатами для сплава сендаст: после магнитно-импульсной обработки при H≤100 кА/м количеством 10 импульсов нагрузка появления трещин возрастает, при этом микротвердость также увеличивается.

В работе [21] показана возможность увеличения статической и усталостной прочности, залечивания пор давлением с помощью обработки магнитными импульсами. Отмечено, что смыкание пор зависит от импульса силы, величины переданной в систему механической энергии и характера нагружения. При этом характер зависимостей импульса давления от амплитуды нагрузки одинаков для дефектов различных форм и размеров.

В работе [22] определяли эффективные режимы обработки метчиков М5 и М10 при воздействии постоянного магнитного поля напряженностью H~65–70 кА/м, с параметрами: t_B = 540–560°С, τ_B = 0,25–4,0 ч. В производственных условиях получено повышение износостойкости метчиков в 2,2 – 2,8 раза (табл.6).

Таблица 6

Зависимость изменения износостойкости (в условных единицах) метчиков М8 из стали Р6М5К5 от режимов их обработки в присутствии постоянного магнитного поля H = 70 кА/м.

Температура выдержки °С	Вид обработки	Время выдержки $\tau_в$, ч.				
		0,25	0,5	1	2	4
500	ТМО	1,5	1,9	1,8	1,6	1,3
560*	ТМО	2,1	2,8*	2,5	2,3	1,5
700	ТМО	1,3	1,2	0,8	–	–
560**	ТО	–	1,1**	–	–	–

*– оптимальный режим обработки образцов;
**– контрольный эксперимент в отсутствии воздействующего магнитного поля.

Механизм повышение износостойкости метчиков авторы связывают со следующими процессами: диффузионным перераспределением термодинамически активного углерода и примесей замещения в направлении приложенного магнитного поля; выделением из мартенсита и остаточного аустенита мелкодисперсных вторичных карбидов, которые, преимущественно располагаются по границам зерен и снижают активность дислокаций, препятствуя их перемещению; появлением двух видов мартенсита.

Опираясь на результаты [22], можно говорить об эффективности совмещения термической и магнитной обработок с целью достижения повышенного уровня эксплуатационных свойств.

В настоящее время интерес представляет химико-термическая обработка металлов и сплавов в электромагнитных полях. В работе [23] авторы предлагают способ ионного азотирования инструментальных сталей в скрещенных электрических и магнитных полях. Утверждается, что использование полей позволяет значительно увеличить энергию ионизированных частиц. В результате установлено, что воздействие ЭМП приводит к повышению микротвердости поверхности в ~6 раз, увеличивается скорость роста упрочненного поверхностного слоя.

Технологии МИО могут быть использованы и с целью разупрочнения материала, например, в строительной, цементной, химической, пищевой, горной и других отраслях промышленности. В работе [24] авторы предлагают способ разупрочнения материалов кристаллической структуры, который предполагает воздействие основного и дополнительного ИМП. В работе предлагается способ, когда силовые линии дополнительного ИМП направлены под углом 30-90 ° к силовым линиям основного поля, длительность импульса составляет от 10^{-2} до 10^{-9} с. Достигаемый результат разупрочнения в данном случае связывают со следующим: внешнее магнитное поле воздействует на руду, содержащую магнитные зерна (магнетит) или минералы с пьезоэффектом (кварц), вызывая в этих зернах эффект магнитострикции и (или) пьезострикции. Также из-за неоднородности свойств материалов, входящих в состав минерала, и наличия воды в микропорах, на границах зерен возникают напряжения. То есть, по всему объему материала (руды) возникают растягивающие и сдвиговые напряжения, приводящие к разрушению материала.

Выводы:

1. Приведенный обзор литературных источников свидетельствует о сложности и многоплановости воздействия ЭМП на различные материалы.
2. Возникающие макроскопические эффекты воздействия ЭМП являются результатом влияния на все структурные и иерархические уровни материала.
3. ЭМП вызывает изменение свойств материалов различной магнитной природы, что позволяет использовать обработку в МП для модификации как магнитных, так и немагнитных материалов.

4. Регулирование и подбор режимов обработки в ЭМП позволяет решать конкретные научные и производственные задачи, получать заданный комплекс свойств.

Список литературы

1. Головин Ю.И. Электромагнитные аспекты физики прочности и пластичности твердых тел // Вестник Тамбовского Университета. Сер. Естественные и технические науки. 1996. Т.1, вып. 1. С. 3-20 .
2. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перкалина Т.М., Урусовская А.А. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля // Физика твердого тела. 1987. Т. 29, № 2. С. 467-470.
3. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // Физика твердого тела. 2004. Т.46, № 5. С. 769-803.
4. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. «In situ» изучение магнитопластического эффекта в кристаллах NaCl методом непрерывного травления // Физика твердого тела. 1991. Т. 33, № 10. С. 3001-3010.
5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект в кристаллах CsL и LiF // Физика твердого тела. 1993. Т. 35, № 2. С. 320-322.
6. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. Роль внутренних механических напряжений в магнито-стимулированном движении дислокаций // Кристаллография. 1998. Т. 43, № 4. С. 689-693.
7. Пинчук А.И., Шаврей С.Д. Магнитопластический эффект в случае двойникования кристаллов висмута под действием сосредоточенной нагрузки // Физика твердого тела. 2001. Т.43, № 1. С. 39-41.
8. Загуляев Д.В. Влияние слабых магнитных полей на микротвердость и ползучесть алюминия: дисс. … канд. техн. наук. Новокузнецк, 2011. 146 с.
9. Бернштейн М.Л. Термомеханико-магнитная обработка металлов и сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1960. № 10. С. 31-36.
10. Садовский В.Д. Магнитное поле и фазовые превращения в стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. № 7. С. 16-18.
11. Эстрин Э.И. Влияние магнитного поля на мартенситное превращение // Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 19, № 6. С. 929-932.

12. Кривоглаз М.А., Садовский В.Д. О влиянии сильных магнитных полей на фазовые переходы // Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18, №. 4. С. 502-505.
13. Калетина Ю.В. Фазовые и структурные превращения в легированных сталях и сплавах под действием магнитного поля и термической обработки : дисс. … док. техн. наук. Екатеринбург, 2009. 319 с.
14. Столяренко А.И., Нечаев Е.П. О свойствах металлов после термомагнитной обработки импульсными магнитными полями до 36 МА/м // Вестник Тамбовского Университета. Сер. Естественные и технические науки. 2010. Т.15, вып.3, ч. 1. С. 1074-1076.
15. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.
16. Берман А.В., Первов К.М., Коровин С.К., Баранов А.П. Ватулин Я.С. Экспериментальные исследования магнитно-импульсной обработки деталей горного оборудования и породоразрушающего инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. Вып. 2, ч. 2. С. 12-17.
17. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Повышение износостойкости деталей комбинированной магнитно-импульсной обработкой // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2006. № 2. С. 24-26.
18. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Влияние импульсных магнитных полей на микротвердость ферро- и парамагнитных сплавов // II международная конференция "Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов" (Орск, 24-25 ноября 2011г.): тез. докл. Орск, 2011. С. 384-390.
19. Воробьев Р.А. Структурные превращения и физико-механические свойства инструментальных и пружинных сталей при магнитно-импульсном воздействии : автореф. дисс. … канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2011. 18 с.
20. Алифанов А.В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : материалы 10 Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 10-13 апреля 2007). Ч. 1. СПб., 2007. С. 9-15.
21. Курлаев Н.В., Гулидов А.И., Рынгач Н.А. Экспериментальные исследования измененеия прочностных свойств и структуры материалов при обработке

импульсным магнитным полем // Сборник научных трудов НГТУ. 2004. № 4 (38). С. 75-82

22. Пудов В.И., Соболев А.С., Драгошанский Ю.Н. Модифицирование изделий из инструментальной стали // Сборник статей 51 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Харьков, 2011. С. 48-50.
23. Рамазанов К.Н., Будилов В.В., Вафин Р.К. Азотирование быстрорежущей стали Р6М5 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 5. С. 39-42.
24. Ананьев П.П., Гончаров С.А., Бельченко Е.Л., Ступников В.П., Осташевский А.А., Тер-Гукасов И.А., Морозов В.А., Боцва С.И. Способ разупрочнения материалов кристаллической структуры и устройство для его осуществления : пат. ЕА 003853В1 : МПК В 02С 19/18 Е 21С 37/18 С 22В 3/22 ; заявл. 28.12.2001; опубл.30.10.2003.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Promising method of low-energy materials processing using a magnetic field

09, September 2012
DOI: 10.7463/0912.0454270

Komshina A.V., Pomel'nikova A.S.

Russia, Bauman Moscow State Technical University
fraulein@list.ru
pomelnikovalla@rambler.ru

The authors give an analytical review of the work related to researches of influence of electromagnetic fields on the structure and properties of materials (dia-, para-and ferromagnetic). The authors provide a classification of effects caused by magnetic fields (constants, variables, pulse) and give classification methods of magnetic material processing. The authors compare the most significant results in this area and summarize prospective mechanisms of interaction of the magnetic field with materials.

.

Publications with keywords:phase transitions, dislocation, strengthening, electromagnetic field, low-energy treatment, material properties, magnetoplastic effect, microhardness, the optimal set of properties
Publications with words:phase transitions, dislocation, strengthening, electromagnetic field, low-energy treatment, material properties, magnetoplastic effect, microhardness, the optimal set of properties

References

1. Golovin Iu.I. Elektromagnitnye aspekty fiziki prochnosti i plastichnosti tverdykh tel [Electromagnetic aspects of the physics strength and plasticity of solid bodies]. *Vestnik Tambovskogo Universiteta* [Tambov University Reports. Ser. Natural and Technical Sciences], 1996, vol. 1, no. 1, pp. 3-20.

2. Al'shits V.I., Darinskaia E.V., Perkalina T.M., Urusovskaia A.A. O dvizhenii dislokatsii v kristallakh NaCl pod deistviem postoiannogo magnitnogo polia [The motion of dislocations in NaCl crystals under a constant magnetic field]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 1987, vol. 29, no. 2, pp. 467-470.

3. Golovin Iu.I. Magnitoplastichnost' tverdykh tel (Obzor) [Magnetoplasticity of solids (Review)]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2004, vol. 46, no. 5, pp. 769-803.

4. Al'shits V.I., Darinskaia E.V., Petrzhik E.A. «In situ» izuchenie magnitoplasticheskogo effekta v kristallakh NaCl metodom nepreryvnogo travleniia [«In situ» study of the magnetoplastic effect in NaCl crystals by the method of continuous pickling]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 1991, vol. 33, no. 10, pp. 3001-3010.

5. Al'shits V.I., Darinskaia E.V., Petrzhik E.A. Magnitoplasticheskii effekt v kristallakh CsL i LiF [Magnetoplastic effect in crystals CsL and LiF]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 1993, vol. 35, no 2, pp. 320-322.

6. Golovin Iu.I., Morgunov R.B., Zhulikov S.E. Rol' vnutrennikh mekhanicheskikh napriazhenii v magnito-stimulirovannom dvizhenii dislokatsii [The role of internal mechanical stresses in the magneto-induced motion of dislocations]. *Kristallografiia* [Crystallography], 1998, vol. 43, no. 4, pp. 689-693.

7. Pinchuk A.I., Shavrei S.D. Magnitoplasticheskii effekt v sluchae dvoinikovaniia kristallov vismuta pod deistviem sosredotochennoi nagruzki [Magnetoplastic effect in the case of twinning of crystals of bismuth under the concentrated load]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2001, vol. 43, no. 1, pp. 39-41.

8. Zaguliaev D.V. *Vliianie slabykh magnitnykh polei na mikrotverdost' i polzuchest' aliuminiia. Kand. diss*. [Influence of weak magnetic fields on the microhardness and creep of aluminium. Cand. diss.]. Novokuznetsk, 2011. 146 p.

9. Bernshtein M.L. Termomekhaniko-magnitnaia obrabotka metallov i splavov [Thermomechanics-magnetic treatment of metals and alloys]. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1960, no. 10, pp. 31-36.

10. Sadovskii V.D. Magnitnoe pole i fazovye prevrashcheniia v stali [The magnetic field and phase transformations in steel]. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1965, no. 7, pp. 16-18.

11. Estrin E.I. Vliianie magnitnogo polia na martensitnoe prevrashchenie Influence of magnetic field on the martensitic transformation [Influence of magnetic field on the martensitic transformation]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 1965, vol. 19, no. 6, pp. 929-932.

12. Krivoglaz M.A., Sadovskii V.D. O vliianii sil'nykh magnitnykh polei na fazovye perekhody [Influence of strong magnetic fields on phase transitions]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 1964, vol. 18, no. 4, pp. 502-505.

13. Kaletina Iu.V. *Fazovye i strukturnye prevrashcheniia v legirovannykh staliakh i splavakh pod deistviem magnitnogo polia i termicheskoi obrabotki. Dokt. diss*.

[Phase and structural transformations in alloyed steels and alloys under the action of magnetic field and heat treatment. Dr. diss.] Ekaterinburg, 2009. 319 p.

14. Stoliarenko A.I., Nechaev E.P. O svoistvakh metallov posle termomagnitnoi obrabotki impul'snymi magnitnymi poliami do 36 MA/m [About the properties of metals after their thermomagnetic treatment by impulse magnetic fields up to 36 MA/m]. *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Ser. Natural and Technical Sciences], 2010, vol. 15, no. 3, pt. 1, pp. 1074-1076.

15. Deliusto L.G. *Osnovy prokatki metallov v postoiannykh magnitnykh poliakh* [Fundamentals of metal rolling in constant magnetic fields]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 272 p.

16. Berman A.V., Pervov K.M., Korovin S.K., Baranov A.P. Vatulin Ia.S. Eksperimental'nye issledovaniia magnitno-impul'snoi obrabotki detalei gornogo oborudovaniia i porodorazrushaiushchego instrumenta [Experimental researches magnetic-pulse processing of details of the mountain equipment and the tool]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Engineering Sciences], 2009, no. 2, pt. 2, pp. 12-17.

17. Ovcharenko A.G., Kozliuk A.Iu. Povyshenie iznosostoikosti detalei kombinirovannoi magnitno-impul'snoi obrabotkoi [Increasing wear resistance of details by combined magnetic-pulse treatment]. *Obrabotka metallov: tekhnologiia, oborudovanie, instrumenty* [Processing of metals: technology, equipment, tools.], 2006, no. 2, pp. 24-26.

18. Komshina A.V., Pomel'nikova A.S., Shipko M.N. Vliianie impul'snykh magnitnykh polei na mikrotverdost' ferr- i paramagnitnykh splavov [Influence of pulsed magnetic fields on the microhardness of ferro-and paramagnetic alloys]. *2 mezhdunarodnaia konferentsiia "Innovatsionnaia deiatel'nost' predpriiatii po issledovaniiu, obrabotke i polucheniiu sovremennykh materialov i splavov" (Orsk, 24-25 noiabria 2011g.): tez.dokl.* [2nd International Conference "Innovation activities of enterprises in research, processing and receipt of modern materials and alloys" (Orsk, 24-25 November 2011): Abstracts.]. Orsk, 2011, pp. 384-390.

19. Vorob'ev R.A. *Strukturnye prevrashcheniia i fiziko-mekhanicheskie svoistva instrumental'nykh i pruzhinnykh stalei pri magnitno-impul'snom vozdeistvii. Avtoreferat kand. diss.* [Structural transformations and physicomechanical properties of tool and spring steels by magnetic pulse action. Abstract of cand. diss.]. Nizhnii Novgorod, 2011. 18 p.

20. Alifanov A.V. Magnitno-impul'snaia uprochniaiushchaia obrabotka metallicheskikh izdelii [Magnetic pulse hardening treatment of metal products]. *Tekhnologiia remonta, vosstanovleniia i uprochneniia detalei mashin, mekhanizmov, oborudovaniia, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki : materialy 10 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 10-13 aprelia 2007)* [Technology of repair, restoration and strengthening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and tooling: proc. of 10th Intern. Scientific-practical conference. (St. Petersburg, 10-13 April 2007)]. St. Petersburg, 2007, pt. 1, pp. 9-15.

21. Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Ryngach N.A. Eksperimental'nye issledovaniia izmeneneiia prochnostnykh svoistv i struktury materialov pri obrabotke impul'snym

magnitnym polem [Experimental studies of the change of mechanical properties and structure of materials in the processing by a pulsed magnetic field]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Collection of scientific works of the NSTU], 2004, no. 4 (38), pp. 75-82

22. Pudov V.I., Sobolev A.S., Dragoshanskii Iu.N. Modifitsirovanie izdelii iz instrumental'noi stali [Modification of products from tool steel]. *Sbornik statei 51 Mezhdunarodnoi konferentsii «Aktual'nye problemy prochnosti»* [Collection of articles of the 51st International Conference "Actual problems of strength"]. Khar'kov, 2011, pp. 48-50.

23. Ramazanov K.N., Budilov V.V., Vafin R.K. Azotirovanie bystrorezhushchei stali R6M5 v tleiushchem razriade s nalozheniem magnitnogo polia [Nitriding of high-speed steel P6M5 in a glow discharge with the imposition of magnetic field]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia* [Hardening technologies and coatings], 2010, no. 5, pp. 39-42.

24. Anan'ev P.P., Goncharov S.A., Bel'chenko E.L., Stupnikov V.P., Ostashevskii A.A., Ter-Gukasov I.A., Morozov V.A., Botsva S.I. *Sposob razuprochneniia materialov kristallicheskoi struktury i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [Way of weakening of materials of the crystalline structure and a device for its implementation]. Patent EA no. 003853B1, 2003.