



*The method of processing in magnetic field of rolled metal surfaces, details of machines and devices is given, and examples of practical application of the developments are given as well.*

Н. С. ХОМИЧ, УП «Полимаг», Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ,  
УП «Технопарк БНТУ «Метолит», В. С. НИСС, БНТУ

УДК 621.74

## ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ

### Введение

В настоящей работе приведен метод обработки в магнитном поле поверхностей проката, деталей машин и приборов, а также даны примеры практического применения разработок.

Всегда актуальна задача повышения важнейших эксплуатационных свойств изделий – сопротивления коррозии, износу и механическому разрушению. В этом плане огромными возможностями обладает метод магнитно-абразивной обработки поверхностей. Его суть составляют три основных эффекта [1, 2]:

1) импульсное магнитное поле «встряхивает» атомно-молекулярную структуру металла, приводит в движение слабозакрепленные дефекты структуры и концентрирует их в поверхностном слое металла;

2) ферроабразивные частицы под действием магнитного поля диспергируют и удаляют дефектный поверхностный слой металла;

3) взамен удаленного дефектного слоя в магнитном поле формируется поверхностный слой с минимумом дефектов – потенциальных очагов коррозии и разрушения.

### Структура металла и импульсное магнитное поле

Структура металлов и сплавов несовершенна и содержит в огромных количествах различные дефекты: точечные (атомные вакансии, атомы замещения и внедрения и др.), линейные (дислокации, дисклинации и др.) и объемные (винтовые дислокации, ротации и др.). Плотность дислокаций в отожженных чистых металлах составляет  $10^6$ – $10^8$  на  $1 \text{ см}^2$ , в пластически деформированных –  $10^{10}$ – $10^{11}$  на  $1 \text{ см}^2$  [3].

Дефекты-неоднородности характеризуются атом-вакансионными связями (АВС) с близлежа-

щими к ним элементами структуры. Абсолютное большинство АВС имеют низкий энергетический уровень, легко разрываются, вступают во взаимодействие с другими АВС, находятся в постоянном движении и способны легко мигрировать в объеме металла. Внешнее физическое или тепловое воздействие приводит в возбужденное состояние атомно-молекулярную структуру прежде всего в зонах неоднородностей – у поверхностей раздела фаз и на границах кристаллов. Здесь возникают интенсивные взаимодействия с АВС мигрирующих дефектов, их концентрация растет, усиливает локальные напряжения и создает в приповерхностном слое металла потенциальные микроочаги коррозии и механического разрушения.

Известно, что импульсное магнитное поле (ИМП) способно активно воздействовать на атомно-молекулярную структуру металла. На практике этот эффект используется, например, для упорядочивания кристаллического строения инструментальных сталей, упрочнения и повышения эксплуатационных свойств инструментов [3, 4]. Автор этих работ предлагает физическую модель процесса перестройки реальной структуры металла под воздействием ИМП. Процесс состоит из следующих стадий:

1) термофлуктуационный разрыв межатомных и междефектных связей;

2) электромагнитная активация разрыва связей при локальном поглощении энергии на неоднородностях строения;

3) повышение концентрации атом-вакансионных пар, латентный период образования АВС, структурная неустойчивость;

4) релаксация АВС, возникновение диссипативных структур.

Металлическая матрица, содержащая возбужденные внешним воздействием АВС, представля-

ет собой энергетически перенасыщенную систему. Дефекты в виде релаксаций АВС стремятся создать избыток энергии как путем упорядочивания структуры металла, так и взаимодействуя с локальными неоднородностями его строения. Концентрация таких неоднородностей имеет место в поверхностном слое металла в виде поверхностных раздела фаз и образованных предшествующей обработкой микродефектов – трещин, сколов, прижогов, примесей, оксидов и др.

Оптимальное сочетание процессов «встраивания» и «залечивания» структуры металла импульсным магнитным полем и процесса удаления дефектного поверхностного слоя «эластичным» ферроабразивным инструментом-порошком обеспечивает магнитно-абразивная обработка.

В последнее время появилось много публикаций, посвященных исследованию на атомно-молекулярном уровне механизмов воздействия электрических и магнитных полей на процессы пластического деформирования материалов. Установлено, что под действием импульсов электрического тока и магнитного потока в материале возникают электропластический [5] и магнитопластический [6] эффекты. Их физическая природа объясняется спин-зависимыми процессами взаимодействия дислокаций и точечными дефектами, которые выполняют функции стопоров для дислокаций. В результате увеличения подвижности дислокаций значительно (на 20–50%) снижается энергия пластической деформации материала, что способствует осуществлению процесса полирования в магнитном поле с массопереносом на атомно-молекулярном уровне и формирования бездефектного приповерхностного слоя и нанорельефа с высотой неровностей менее 10 Å.

#### **Магнитно-абразивная обработка и качество поверхности**

Процесс магнитно-абразивной обработки (МАО) проводится ферроабразивным порошком-инструментом, который под воздействием магнитного поля уплотняется, прижимается к обрабатываемой поверхности и полирует ее. Некоторые схемы реализации процессов обработки в магнитном поле различных изделий приведены на рис. 1.

Степень уплотнения или «эластичность» порошка регулируется в широких пределах изменением величины магнитного потока в зоне обработки. Среднее значение нормальной силы воздействия единичного зерна ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность составляет около 0,01 Н. При шлифовании эта величина равна 2–12 Н.

Вращающееся в магнитном поле металлическое изделие может нагреваться вихревыми токами до 50–70 °С, а температура на поверхности изделия, вызванная контактом с порошком-инст-

рументом, во время работы составляет обычно не более 110 °С. При подаче в рабочую зону смазочно-охлаждающей жидкости в количестве не менее 0,01 л/с на 1 см<sup>2</sup> установившаяся температура нагрева изделий в процессе магнитно-абразивной обработки не превышает 65 °С. При шлифовании этот показатель составляет 800–1500 °С.

Относительно малое давление порошка-инструмента на обрабатываемую поверхность и незначительный нагрев изделия во время магнитно-абразивной обработки способствуют формированию поверхностных слоев с минимальным количеством дефектов структуры. При полировании в магнитном поле с преобладанием процессов микро- и субмикрорезания глубина собственного нарушения слоя не превышает 1–2 мкм. Однако при необходимости можно обеспечить такие условия обработки, при которых имеют место преимущественно процессы микро- и субмикровыглаживания. В этом случае глубина наклепанного слоя достигает 10–12 мкм, а микротвердость приповерхностного слоя увеличивается на 10–20%. Остаточные напряжения 1-го рода являются сжимающими и составляют у поверхности изделия 1,1–2,0 ГПа. После операции шлифования эти напряжения являются растягивающими и составляют 0,1–0,6 ГПа.

Размерный съем металла при МАО, как правило, находится в пределах 3–30 мкм, а шероховатость поверхности снижается в 2–10 раз.

Силовое и температурное воздействие МАО на формируемую поверхность на 1–2 порядка меньше, чем при шлифовании. Уже по этим причинам качество поверхности, обработанной МАО, значительно выше, чем шлифованной. Это обстоятельство, а также возможность управлять в широких пределах параметрами процесса позволили разработать и реализовать ряд эффективных технологических процессов обработки изделий в магнитном поле.

#### **Технологические процессы магнитно-абразивной обработки**

Технология МАО заменяет ручные трудоемкие операции, а также экологически вредные процессы химической и электрохимической обработки, повышает важнейшие эксплуатационные свойства изделий сопротивление износу, коррозии и механическому разрушению. Разработано оборудование и реализованы процессы МАО, представленные в табл. 1.

Приведенные технологические возможности процессов МАО не являются предельными. Имеются значительные резервы повышения эффективности полирования и зачистки в магнитном поле изделий из разнообразных материалов – от органического стекла до различных металлических сплавов и керамики.

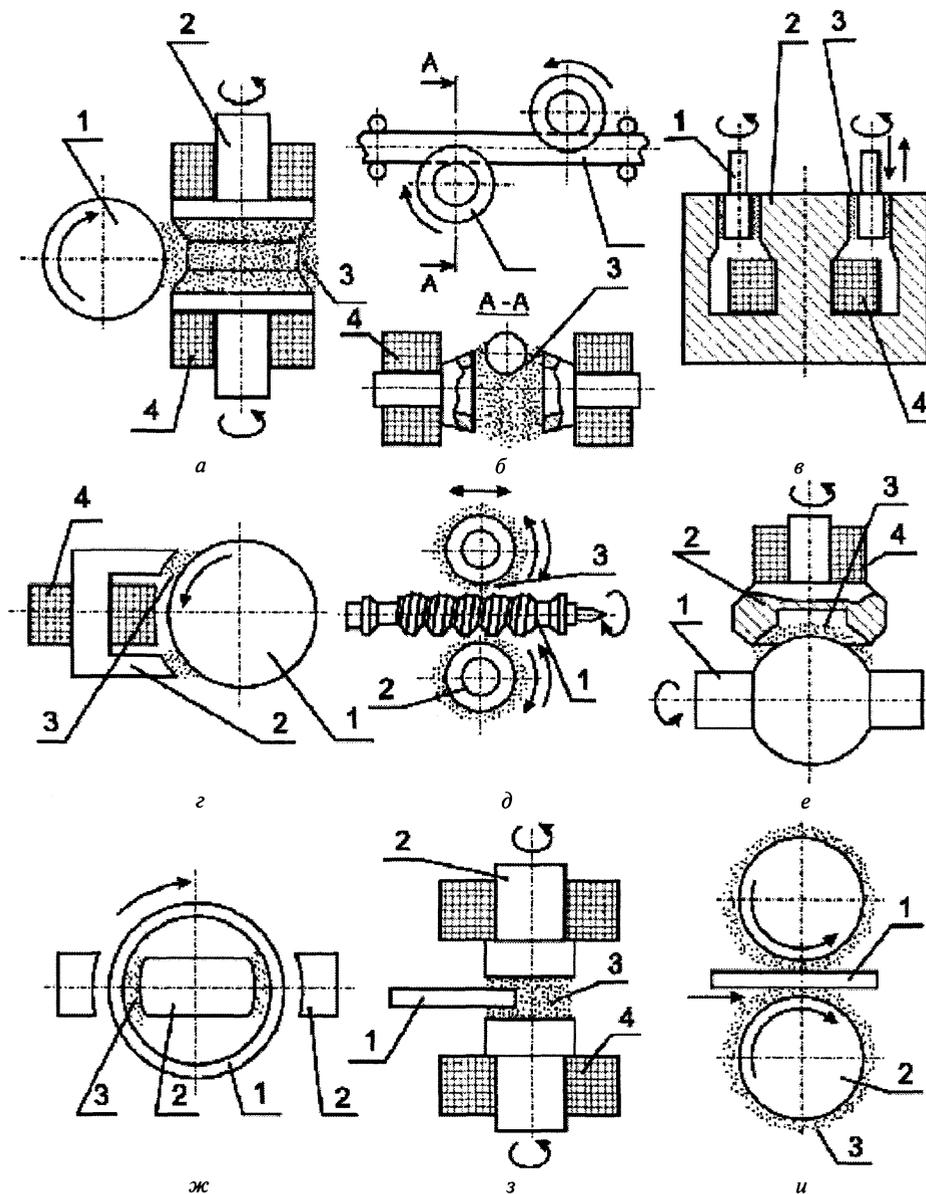


Рис. 1. Схемы магнитно-абразивной обработки: а – валов; б – прутков и труб; в – поверхностей тел вращения; г – крупногабаритных валов; д – винтов; е – сфер; ж – отверстий; з – кромок; и – листов и лент; 1 – обрабатываемое изделие; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферроабразивный порошок; 4 – электромагнитные катушки

Таблица 1. Примеры технологических процессов MAO изделий

Наименование технологического процесса	Основные характеристики технологического процесса
Магнитно-абразивная зачистка кромок изделий под сварку	Толщина зачищаемой кромки 3–20 мм, производительность 0,2–1,5 м/мин
Магнитно-абразивная зачистка проволоки, катанки и наружных поверхностей труб	Диаметр проката 0,5–6,0 мм, производительность 10–600 м/мин
Магнитно-абразивная зачистка концов эмальпровода	Диаметр провода 0,1–3,0 мм, время зачистки провода на длину 20 мм 3–5 с
Магнитно-абразивное полирование прутков и труб	Диаметр изделия 3–14 мм, производительность 1,0–3,6 м/мин
Магнитно-абразивное полирование валов	Диаметр вала 15–200 мм, производительность 0,1–3,0 м/мин
Магнитно-абразивная зачистка листовых немагнитных материалов	Размеры изделия: ширина < 250 мм, толщина 0,5–2,0 мм, длина > 170 мм, производительность 0,5–4,0 м/мин
Магнитно-абразивное полирование винтовых поверхностей	Диаметр изделия 10–150 мм, модуль 1–7 мм, производительность 30–120 изд./ч
Магнитно-абразивное полирование сферических поверхностей	Диаметр изделия 25–300 мм, производительность 15–90 изд./ч

### Примеры практического применения процессов

Широкие технологические возможности в сочетании со специально созданными составами смазочно-охлаждающих жидкостей и порошков-инструментов позволили реализовать на практике процессы магнитно-абразивной обработки для решения следующих задач:

1) полирование контактирующих поверхностей деталей машин, подверженных значительным механическим нагрузкам и работающих на износ, контактную и циклическую прочность;

2) зачистка поверхностей изделий перед сваркой;

3) полирование поверхностей до и после нанесения покрытий;

4) очистка поверхностей изделий от оксидных пленок и дефектных слоев.

### Полирование в магнитном поле контактирующих поверхностей

Показателен пример применения MAO для полирования рабочих дорожек колец подшипников качения привода вращения лопастей вертолета. Полирование этих изделий в магнитном поле позволило снизить шероховатость и волнистость поверхностей в 4–10 раз и сформировать качественный поверхностный слой, что дало возможность повысить износостойкость и контактную прочность на 30–60% по сравнению со шлифованной поверхностью. В отдельных случаях процесс MAO повышает износостойкость стальных изделий до 3 раз [7].

Также эффективно применение MAO для полирования поверхностей трения скольжения, например, штоков-иглопроводителей швейных машин. Износ обработанных MAO поверхностей штоков диаметром 7 мм составил 1–2 мкм за 100 ч стендовых испытаний, а износ шлифованных штоков за это же время – 7–10 мкм. При этом уровень шума при работе обработанных MAO штоков ниже на 30%.

Разработана технология MAO винтовых и гладких цилиндрических поверхностей винтов, червяков, валов и других деталей. Полирование в магнитном поле (с одновременным удалением заусенцев и закруглением острых кромок на витках и шлицах) снижает шероховатость и волнистость поверхностей рабочих витков в 3–6 раз, улучшает качество поверхностного слоя, повышает износостойкость и контактную прочность витков на 20–40%. Зубчатая пара редуктора, содержащая отполированный в магнитном поле червяк, имеет повышенные значения нагрузочной способности и пониженные потери на трение.

### Магнитно-абразивная зачистка поверхностей перед сваркой

Качественную сварку металлических изделий можно выполнить лишь после тщательной зачи-

стки (очистки) свариваемых поверхностей от пленок оксидов, дефектов и загрязнений. Иначе они попадают в тело сварного шва и снижают его прочность и коррозионную стойкость. Особенно затруднительно подготовить к сварке поверхности изделий из химически активных сплавов на основе алюминия, магния и титана. По заказу космического и авиационного аппаратостроения решена сложная задача зачистки перед сваркой кромок элементов конструкции летательных аппаратов – обечаек и пластин из Al-Mg сплавов [1]. Магнитно-абразивной обработкой на оптимальных режимах с поверхностями кромок удаляются оксидные пленки и загрязнения. Формируется тонкая стекловидная оксидная пленка, которая с течением времени практически не растет и предохраняет основной металл от коррозии. В процессе сварки эта пленка под воздействием флюса и сварочной дуги полностью разлагается и не вносит дефекты в формируемый сварной шов. Пригодность к сварке кромок после MAO составляет не менее 30 сут, а для альтернативных операций – химического травления и механического шабрения – этот показатель составляет 1/3 и двое суток соответственно. Испытания сварных швов на механическую прочность (предел прочности, предел текучести и др.) показали, что зачистка кромок в магнитном поле обеспечивает более высокие значения указанных характеристик, чем у образцов после электрохимического полирования и химического травления. Так как MAO не требует применения токсичных растворов кислот и щелочей, то и в экологическом и экономическом отношениях эта технология предпочтительнее.

Хорошие результаты дает применение MAO для зачистки поверхностей листовых изделий из легированных (нержавеющих) сталей перед их термодиффузионной сваркой.

Поскольку при сварке сплавов часто используют в качестве плавящегося электрода проволоку из этого же сплава, то потребовалось также решить задачу очистки поверхности проволоки. Для этих целей разработаны технология и оборудование, позволяющие на одном станке без переналадки и дополнительных мер зачищать проволоку из различных сплавов.

### Полирование поверхностей до и после нанесения покрытий

В атомном машиностроении сложнейшей проблемой является обеспечение необходимой коррозионной стойкости наружных поверхностей оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), работающих в среде пара при давлении 200 атм и температуре 300°C. Оболочки изготавливают из циркониевых сплавов, а финишную обработку осуществляют электрохимическим полированием в чрезвычайно агрессивных

растворах плавиковой кислоты. Эта технология в экологическом отношении крайне ущербна и требует огромных затрат для обеспечения безопасных условий труда. Предпринятая попытка заменить электрохимическую обработку твэлов на полирование в магнитном поле дала обнадеживающие результаты. Разработанная технология и оборудование позволяют полировать наружные поверхности твэлов-труб и формировать поверхностный слой с минимумом дефектов структуры. В результате магнитно-абразивного полирования с использованием пассивирующих добавок к смазочно-охлаждающей жидкости на поверхности труб-твэлов получена тонкая стекловидная пленка оксидов циркония, которая наращивается дополнительными технологическими приемами и приобретает необходимую коррозионную стойкость в реакторных условиях.

Создан оригинальный процесс полирования внутренних поверхностей труб прямоугольного сечения размерами от 3×6 до 7×14 мм. Трубы из медных сплавов, применяемые в качестве волноводов устройств СВЧ, полировали в магнитном поле, затем на полированную поверхность наносили серебряное покрытие толщиной около 30 мкм и проводили повторное полирование с уплотнением покрытия и обеспечением  $R_a=0,10-0,05$  мкм.

Имеется опыт магнитно-абразивного полирования хромовых и керамических покрытий различных изделий.

#### Магнитно-абразивная очистка поверхностей от оксидных пленок и дефектных слоев

Очистке в магнитном поле подвергаются листы, ленты, прутки, трубы, проволока и другие изделия.

Заготовки печатных плат имеют вид листов стеклотекстолита, покрытых медной фольгой толщиной 35 мкм. Перед нанесением фоторезиста с поверхности фольги необходимо удалить пленку оксидов меди толщиной 2–4 мкм и сформировать поверхность с  $R_a=0,2-0,6$  мкм. Для осуществления операции создан станок, который зачищает фольгированный лист одновременно с двух сторон производительностью 0,5–4,0 м/мин. Возможна зачистка на станке листов и лент из немагнитных сплавов толщиной до 2 мм и шириной до 250 мм [1].

Создано малогабаритное устройство для магнитно-абразивной очистки концов эмальпровода перед соединением пайкой, сваркой или механическим креплением. Зачистка производится одновременно двумя «щетками» из ферроабразивного порошка, сформированными на периферии магнитных дисков. Конец провода вводится в зону обработки на длину зачистки. При обработке с поверхности провода удаляются лакокрасочные покрытия и загрязнения, а со вскрытой поверхности основного металла – оксиды и слой металла толщиной 2–10 мкм. Эта вновь сформированная поверхность полностью подготовлена к соединению сваркой или пайкой. Диаметр зачищаемого провода – 0,1–3,0 мм, время зачистки – 3–5 с.

#### Нанотехнология полирования в магнитном поле прецизионных поверхностей

Электронная промышленность предъявляет высокие требования к качеству поверхности кремниевых пластин – подложек интегральных схем. Существующая технология подготовки пластин включает большое количество дорогостоящих и экологически вредных этапов обработки поверхности (шлифование, полирование, химико-механическое полирование, химическое травление), в ходе которых удаляется значительное количество материала. Процессы химической обработки занимают около 1/3 всех технологических операций, что вызывает проблему утилизации применяемых агрессивных химических реагентов. Магнитно-абразивная обработка (МАО) может применяться после среднего шлифования и способна заменить ряд этапов одной технологической операцией за счет использования уникального инструмента – ферроабразивного порошка с управляемыми упругомеханическими свойствами (изменение режимов обработки осуществляется путем регулирования величины индукции магнитного поля).

Для полирования в магнитном поле плоских поверхностей деталей оптики и электроники диаметром до 300 мм создан экспериментальный образец станка мод. 3905 [2]. В табл. 2 приведены результаты МАО образцов пластин монокристаллов кремния (подложки интегральных схем) и монокристаллов фторидов бария, магния и кальция (оптически активные элементы силовых лазерных устройств).

Таблица 2. Результаты МАО образцов монокристаллов кремния и фторидов бария, магния и кальция

Монокристалл	Размер алмазных зерен в ферроабразивном порошке, мкм	Время полирования $t$ , мин	Характеристика нанорельефа $R_a$ , нм
Si	10 / 7	5	10 – 15
Si	1 / 0,5	10	0,7 – 2,0
BaF <sub>2</sub>	1 / 0,5	10	2,0
CaF <sub>2</sub>	1 / 0,5	10	1,54
MgF <sub>2</sub>	1 / 0,5	10	2,19

В лучших экспериментах процесс MAO с использованием ферроабразивного порошка «железо-алмаз» обеспечивает шероховатость поверхности, характеризуемую  $R_a=0,7-2,0$  нм. Следует отметить, что постоянная кристаллической решетки кремния  $a=5,4$  Å (0,54 нм). Очевидно, что нанотехнология MAO позволяет формировать поверхность пластины монокристалла кремния с величиной неровностей в 2–4 атомных слоя. Эти показатели вполне соответствуют требованиям оптико-электронной промышленности ближайшего будущего [8].

Известно [9], что в постоянном магнитном поле с индукцией  $B>0,2$ Тл подвижность дислокаций в выращенном по методу Чохральского легированном бором монокристалле кремния увеличивается на 30–45%. Следовательно, использование магнитного поля при финишной обработке монокристаллов кремния приводит к улучшению обрабатываемости материала за счет уменьшения предела текучести, а также к более интенсивному выходу дислокаций на поверхность и уменьшению количества линейных дефектов кристаллической структуры. MAO позволяет получить поверхность с характеристикой шероховатости  $R_a<1$ нм, не вызывая образования дефектного поверхностного слоя [8] и необходимости его удаления химическими методами.

### Выводы

Приведенные выше результаты многолетних исследований и экспериментов позволяют сделать ряд выводов.

1. Уникальная возможность совместного воздействия импульсов магнитного поля на структуру металла и «мягких» режимов удаления дефектного поверхностного слоя дает возможность магнитно-абразивным способом сформировать поверхность с минимальным количеством дефектов и

высокими эксплуатационными свойствами — сопротивлением коррозии, износу и механическим нагрузкам.

2. В ближайшем будущем в производстве машин и приборов многие изделия должны подвергаться магнитно-абразивной обработке, что позволит существенно повысить их прочность и срок службы, а также уменьшить расход металла.

3. Экологически и экономически целесообразно многие операции химического травления и электрохимического полирования изделий заменить на процессы магнитно-абразивной обработки.

### Литература

1. Хомич Н.С. Магнитно - абразивная обработка: технология и оборудование. Мн.: БелНИИИТИ, 1991.
2. Хомич Н.С., Алексеев Ю.Г., Нисс В.С. и др. Нанотехнология полирования в магнитном поле поверхностей деталей оптики, электроники и лазерной техники // Порошковая металлургия: достижения и проблемы. Сб. докл. междунар. науч.-техн. конференции. Мн., 22-23 сентября 2005 г. Мн.: БИТУ, 2005. С. 223–225.
3. Постников С. Н. Физические основы обработки материалов и изделий последовательностью импульсов слабого магнитного поля // Доклады на трети научно-технической семинар с международно участие по технологии за довшващо обработваню. Варна, 1987. С. 199–207.
4. Postnikov S. N. Electrophysical and Electrochemical Phenomena in Friction, Gutting and Lubrication. New York C London, Toronto, Melburne a.o.): Van Nostrand Reinhold, 1978.
5. Троицкий О.А. Влияние пинч-эффекта на пластическую деформацию металла// Металлургия машиностроения. 2003. № 5.
6. Смирнов Б.И., Песчанская Н.Н., Николаев В.И. Магнитопластический эффект в сегнетоэлектрических кристаллах  $\text{NaNO}_2$  // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 12. С. 2154–2156.
7. Wantuch E., Zutze H. Magnet- abrasive Bearbeitung // Neue Fertigungstechnologien. 2002. N. 5. S. 232–237.
8. Khomich M., Alexeev Y., Demmer A. et. al. Magnetic-abrasive machining of silicon-wafers a novel approach // Industrial Diamond Review. 2004. N. 3. P. 45–48.
9. Осипьян Ю.А., Моргунов Р.Б., Баскаков А.А. и др. Магниторезонансное упрочнение монокристаллов кремния // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. № 3. С. 158–162.