



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 см^2 , в пластически деформированных – 10^{10} – 10^{11} на 1 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 см² 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.

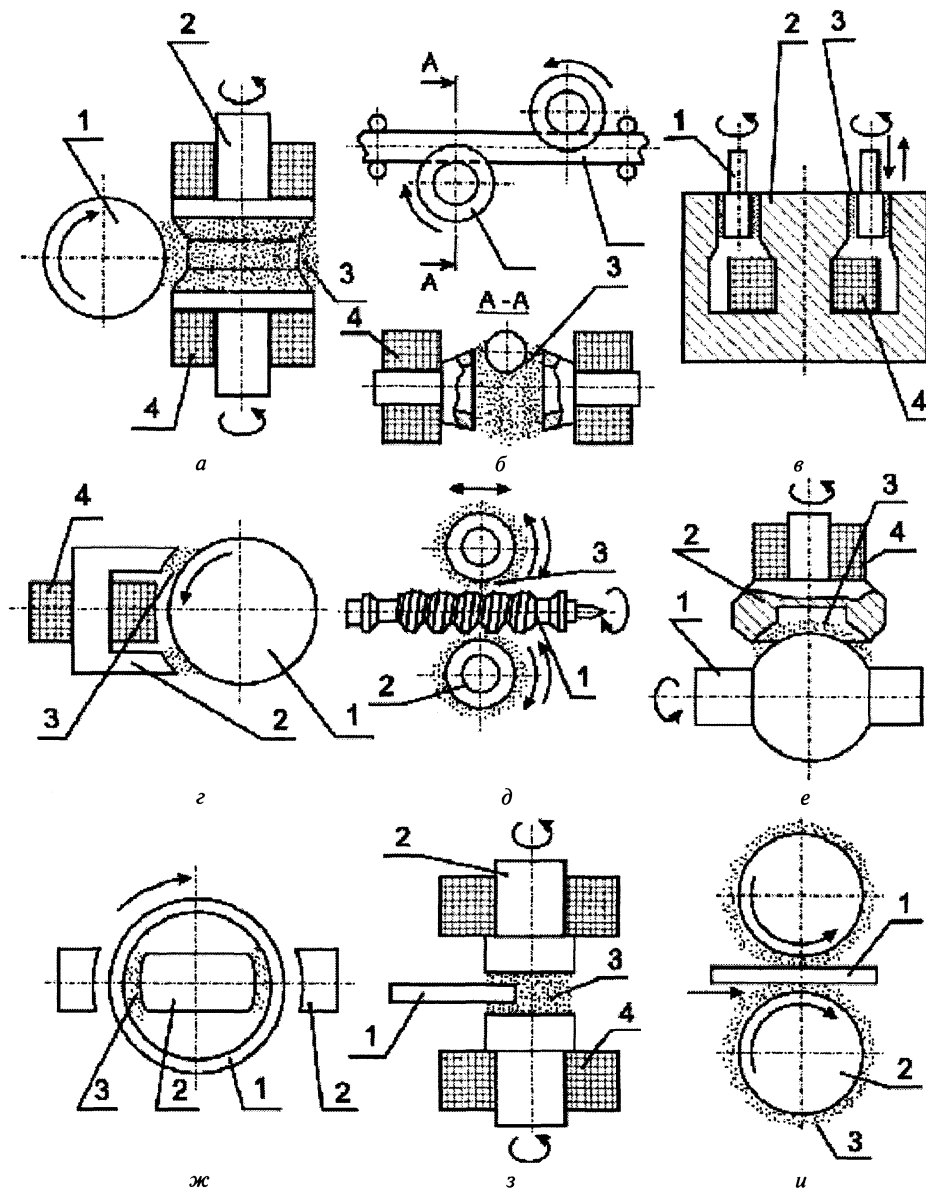


Рис. 1. Схемы магнитно-абразивной обработки: а – валов; б – прутков и труб; в – поверхностей тел вращения; г – крупногабаритных валов; д – винтов; е – сфер; ж – отверстий; з – кромок; и – листов и лент; 1 – обрабатываемое изделие; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферроабразивный порошок; 4 – электромагнитные 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 (MAO) 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 MAO образцов пластин монокристаллов кремния (подложки интегральных схем) и монокристаллов фторидов бария, магния и кальция (оптически активные элементы силовых лазерных устройств).

Таблица 2. Результаты MAO 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 ₂	1 / 0,5	10	2,0
CaF ₂	1 / 0,5	10	1,54
MgF ₂	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 довршващо 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 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.