

×300

×500

Рис. 4. Микрорельеф изношенной поверхности алмазной шлифовальной головки, упрочненной методом ТГХО в Ti–Mo-суспензии

ВЫВОДЫ

1. Предложенное низкотемпературное термогидрохимическое упрочнение алмазного инструмента достигается формированием многокомпонентного дискретного покрытия, которое обеспечивает алмазосодержащему материалу высокие антифрикционные свойства и хорошую адгезионную связь на границе «алмаз – связка», а также создание в поверхностной зоне высоких напряжений сжатия.

2. Использование низкотемпературного способа термогидрохимической обработки в Ti–Mo-суспензии позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов алмазного режущего инструмента в 1,3–4,0 раза по сравнению со стандартным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чеповецкий, И. Х.** Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1978. – 227 с.
2. **Полевой, С. Н.** Упрочнение металлов / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
3. **Мельников, П. С.** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П. С. Мельников. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.

4. **Hocking, M. G.** Metallic and Ceramic Coatings. Production, Properties and Applications / M. G. Hocking, V. Vasantasree, P. S. Sidky. – London; New York, 2000. – 518 p.

5. **Химико-термическая** обработка металлов и сплавов: справ. / под ред. Л. С. Ляхович. – М.: Metallurgy, 1981. – 424 с.

6. **Состав** для упрочнения режущего инструмента в процессе резания: а. с. 1340219 СССР / Н. С. Салманов, Г. А. Околович, В. Б. Бутыгин; опубл. 26.06.84.

7. **Ильющенко, А. Ф.** Исследование альтернативных процессов нанесения слоя твердого электролита на высокопористую подложку несущего электрода / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Д. Р. Виолентий // Порошковая металлургия. – 2007. – № 30. – С. 138–143.

8. **Способ** упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: а. с. 1434777 СССР / Ю. П. Буравчук, С. В. Оржеховский, Г. К. Новикова и др.; опубл. 22.07.86.

9. **Виноградова, Т. В.** Гидрохимическое осаждение пленок сульфидов свинца, серебра и твердых растворов замещения на их основе для создания датчиков экологического контроля: дис. ... канд. хим. наук / Т. В. Виноградова. – Екатеринбург, 2005. – 209 с.

10. **Способ** упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2023027 Российская Федерация / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин; опубл. 15.11.94 // Бюл. изобр. – 1994. – № 21.

11. **Балабанов, В. И.** Триботехнологии в техническом сервисе машин / В. И. Балабанов, С. А. Ищенко, В. И. Беклемышев. – М.: Изумруд, 2005. – 192 с.

12. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 135 с.

Поступила 07.07.2008

УДК 681.7.064

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

*Канд. техн. наук ХОМИЧ Н. С., ЛУГОВИК А. Ю.,
канд. техн. наук, доц. ФЕДОРЦЕВ Р. В., КОРЗУН А. Е., КУХТО П. В.*

*Научно-инженерное предприятие «Полимаг»,
Белорусский национальный технический университет,
научно-производственное объединение «Интеграл»*

Монокристаллические кремниевые подложки широко используются в электронной промышленности в качестве основы интегральных

микросхем и других компонентов полупроводниковых приборов. Использование кремниевых пластин большого диаметра (200, 300 мм) поз-



Рис. 1. Инструмент для финишной обработки Wurt-Ex

воляет снизить себестоимость изготовления микросхем за счет увеличения числа годных чипов, получаемых с одной пластины [1].

Технологический процесс изготовления кремниевых подложек предусматривает замкнутый цикл механической обработки и наличие следующих основных операций: тонкое шлифование, шлифование со свободной подачей, хонингование, промывку, полирование, травление, сухое свободное полирование [2]. В настоящее время к ведущим производителям станков-автоматов для шлифования и полирования подложек можно отнести компании Peter Wolters, PR Hoffman, Fine-Tech, Studer и др. Особенности конструкции такого оборудования являются: планетарный механизм перемещения заготовок в рабочей зоне, многшпindelный инструмент со «скользящей» щеткой (рис. 1) и высокостабилизированная система гашения внешних вибраций [3].

Стоимость такого оборудования в зависимости от комплектации на мировом рынке составляет 200–400 тыс. евро. В связи с этим актуальной становится задача совершенствования технологии и оборудования для финишной обработки кремниевых пластин, решение которой должно привести к снижению себестоимости применяемого технологического оборудования, усовершенствованию существующих методов и схем обработки, созданию и внедрению новых, эффективных способов подготовки поверхности кремниевых пластин.

Альтернативой трудоемким и экологически вредным способам механического и химико-механического полирования является метод магнитно-абразивной обработки композиционными ферроабразивными порошками. Сущность метода магнитно-абразивного полирования (МАП) состоит в том, что ферроабразивный порошок-инструмент располагается между полюсами электромагнита, образуя своеобразную «эластичную полирующую щетку». При движении обрабатываемой заготовки через рабочую зону ферроабразивный порошок оказывает давление в каждой точке обрабатываемой поверхности заготовки. Благодаря тому что на каждое зерно абразива, находящееся в контакте с обрабатываемой поверхностью, действуют силы резания, а движению зерен вместе с поверхностью заготовки препятствуют окружаю-

щие зерна, которые под действием сил магнитного поля образуют достаточно плотную массу, происходят съем материала и формирование нанорельефа поверхности [4].

Поисковые исследования, выполненные в Белорусском национальном техническом университете совместно со специалистами из Fraunhofer Institute Produktionstechnology (г. Аахен, Германия), показали перспективность использования метода МАП для финишной обработки плоских прецизионных поверхностей деталей оптики и электроники [5].

Для выбора рациональной схемы магнитно-абразивной обработки и последующего проектирования технологического оборудования для МАП кремниевых пластин разработана математическая модель, отражающая основные принципы взаимодействия инструмента и заготовки.

В основу данной модели положена гипотеза Ф. Престона [6], в соответствии с которой линейный износ U детали или величину съема припуска в произвольной точке обрабатываемой поверхности можно определить следующим образом:

$$U = ck_{\text{д}} \int_0^T v p dt,$$

где c – коэффициент, зависящий от условий, в которых протекает процесс обработки; $k_{\text{д}}$ – коэффициент износостойкости материала заготовки; v – скорость относительного движения заготовки и инструмента, м/с; p – давление инструмента на обрабатываемую поверхность, Н/м²; T – общее время обработки, с.

Для оценки формы обработанной поверхности заготовки необходимо выбрать на ней некоторое количество точек, называемых в дальнейшем опорными, и определить износ в этих точках. Относительный износ u_{ij} в каждой конкретно выбранной опорной точке M_{ij}

$$u_{ij} = \frac{U_{ij}}{ck_{\text{д}}} = \int_0^T v_{ij} p_{ij} dt,$$

где v_{ij} , p_{ij} – соответственно функции скорости относительного скольжения и давления в окрестности опорной точки.

Относительный износ показывает, во сколько раз износ в одной точке больше, чем в другой. Он не зависит от коэффициентов c и k_d , которые на данном этапе моделирования считаются постоянными, а определяется распределением параметров v и p , а также суммарным временем обработки T_{Σ} .

Для проверки модели в соответствии с кинематической схемой, представленной на рис. 2, спроектирован и изготовлен экспериментальный образец станка модели 3905 (рис. 3) для магнитно-абразивного полирования плоских заготовок в виде дисков. Как видно из схемы, станок реализует три рабочих движения: вращение верхнего полюсного наконечника 2 с частотой ω , c^{-1} , вращение обрабатываемой пластины 1 вокруг собственной оси с частотой Ω , c^{-1} , и возвратно-поступательное движение кремниевой подложки с амплитудой S , м [7].

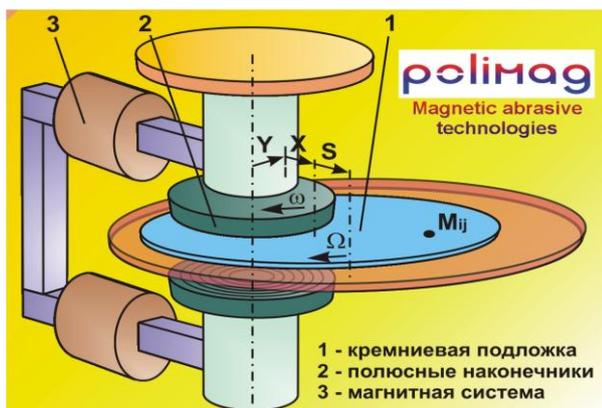


Рис. 2. Схема магнитно-абразивной обработки кремниевых подложек интегральных микросхем



Рис. 3. Внешний вид станка модели 3905

Следует отметить некоторые экспериментально установленные технологические особенности магнитно-абразивного полирования заготовок кремниевых пластин:

1. В процессе обработки нет непосредственного силового кинематического замыкания верхнего полюсного наконечника-инструмента с поверхностью кремниевой пластины (заготовкой).

2. Ферроабразивные частицы порошка под воздействием магнитного поля формируют «эластичную щетку», которая и производит полирование поверхности.

3. Композиционный ферроабразивный порошок относительно крупной зернистости (например, 40/0 мкм) может обеспечить на поверхности изделия шероховатость, характеризующую $R_a < 2$ нм. Этот, на первый взгляд, противоречивый факт объясняется следующим образом: анализ предварительных расчетов показывает, что величина удельного давления на обрабатываемую неметаллическую поверхность при МАП составляет $(0,3-0,8) \cdot 10^2$ Н/м² [8], тогда как при шлифовании кремниевых пластин свободным абразивом по традиционной технологии на станке модели СДШ-100 значение этого параметра лежит в пределах $(0,8-1,8) \cdot 10^4$ Н/м² [9]. Получение конкретных численных значений удельного давления «эластичной щетки» на обрабатываемую поверхность при МАП требует проведения дополнительных экспериментальных исследований, но уже сейчас можно предположить, что изменение параметра p в процессе обработки крайне незначительно, поэтому его величину на данном этапе моделирования можно считать постоянной.

С учетом изложенного выше математическая модель, описывающая с необходимой точностью процесс МАП с точки зрения кинематики, была получена путем синтеза двух методов обработки: традиционного – свободного абразивного притирания, реализуемого на станках с возвратно-поступательным перемещением двух звеньев, и классической схемы магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей, в соответствии с которой два полюсных наконечника располагаются друг против друга на некотором расстоянии (до 10 мм).

Принципиальной особенностью предлагаемой модели является предположение, что износ полируемой поверхности определяется, прежде всего, взаимным расположением инструмента и заготовки, а также их геометрическими и кинематическими параметрами. Для этого в каждый дискретный момент времени требуется вычислить относительную скорость движения заготовки v и суммарное время обработки T_{Σ} . Созданная компьютерная программа реализует возможность моделирования размерного съема материала при МАП по всей поверхности пластины (рис. 4).

Алгоритм работы программы следующий:

1. Для оценки интенсивности обработки задается массив опорных точек M_{ij} на рабочей поверхности пластины диаметром 150 мм, в которых определяется съем припуска.

2. При моделировании процесса МАП вся поверхность разбивается на секторы примерно одинаковой площади (около 25 мм²), центры которых являются опорными точками. Массив данных при этом состоит из 756 элементов.

3. Общее время обработки T разбивается на конечное число малых промежутков $dt = 0,001$ с. Для каждой опорной точки вычисляются величина T_{Σ} , а также значение v в каждый дискретный момент времени. Далее выполняется пересчет массива данных с одновременным поиском максимального и минимального элементов. Разность между максимумом и минимумом, выраженная в нано- или микрометрах,

характеризует общую неравномерность обработки.

Численные исследования показали, что на равномерность обработки поверхности кремниевой пластины и интенсивность съема припуска материала максимальное влияние оказывают следующие параметры:

а) расстояние X между осями вращения инструмента и заготовки в начальный момент времени;

б) поперечное смещение траектории движения пластины Y ;

в) амплитуда S возвратно-поступательного движения заготовки (рис. 2).

К прочим параметрам, значения которых подобраны опытным путем и оставались неизменными на протяжении всего эксперимента, относятся:

- частота вращения инструмента $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$;
- частота вращения заготовки $\Omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$;
- общее время обработки $T = 600 \text{ с}$;
- однонаправленное вращение инструмента и заготовки (по часовой стрелке).

Анализ результатов предварительных поисковых экспериментов позволил сделать вывод о том, что значения интенсивности обработки плавно изменяются от максимума к минимуму по всему диапазону значений. Поэтому в целях сокращения объема вычислений для всех оптимизируемых параметров шаг изменения оставался постоянным (10 мм).

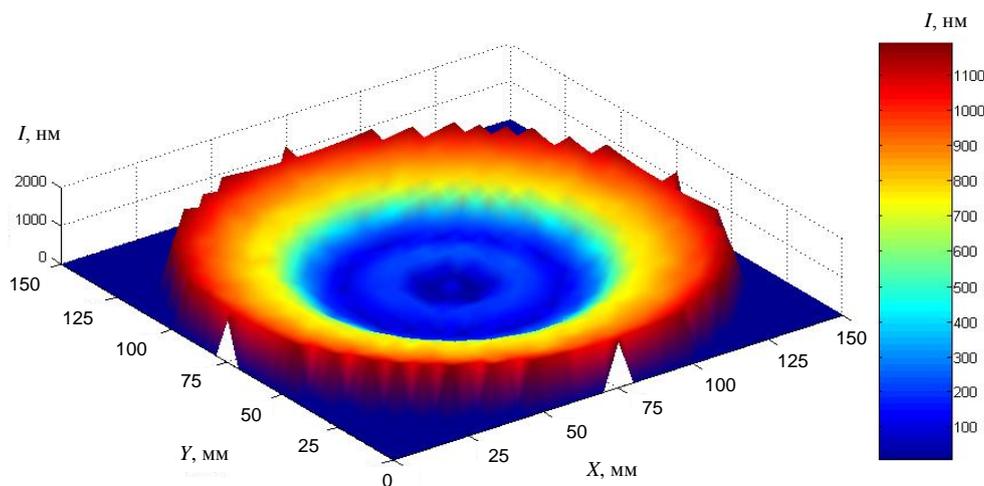


Рис. 4. Топограмма интенсивности обработки по всей поверхности кремниевой пластины $\varnothing 150$ мм

На рис. 5а–г представлены результаты первого этапа проведения численных исследований. Минимальные значения интенсивности обработки на всех трехмерных графиках иллюстрируют наборы искомых наладочных параметров станка, оптимальные с точки зрения получения наименьшего значения неравномерности обработки.

Второй этап виртуальных экспериментальных исследований включал в себя исследование окрестностей всех найденных минимумов с уменьшенным шагом сканирования, равным 1 мм. Результатом поиска стали два набора параметров:

1 – $X = 90$ мм, $Y = 10$ мм, $S = 25$ мм;

2 – $X = 90$ мм, $Y = 35$ мм, $S = 30$ мм,

обеспечивающие среднее значение неравномерности обработки на уровне 200 нм. Характер топограммы поверхности в обоих случаях

совпадает и представляет собой «яму» с возвышением в центре (рис. 6).

Для проверки полученных оптимальных наборов наладочных параметров станка и подтверждения правильности разработанной математической модели проведены реальные физические эксперименты по МАП кремниевых пластин диаметром 150 мм и толщиной 0,4 мм на станке модели 3905. Графическая интерпретация результатов измерений толщины двух полированных подложек представлена на рис. 7. Анализ данных показывает, что среднее значение неравномерности обработки составляет 3,42 и 4,59 мкм соответственно для первого и второго наборов параметров X , Y и S , что соответствует стандартным спецификациям на пластины кремния, допускающим неплоскостность не более 5 мкм [10].

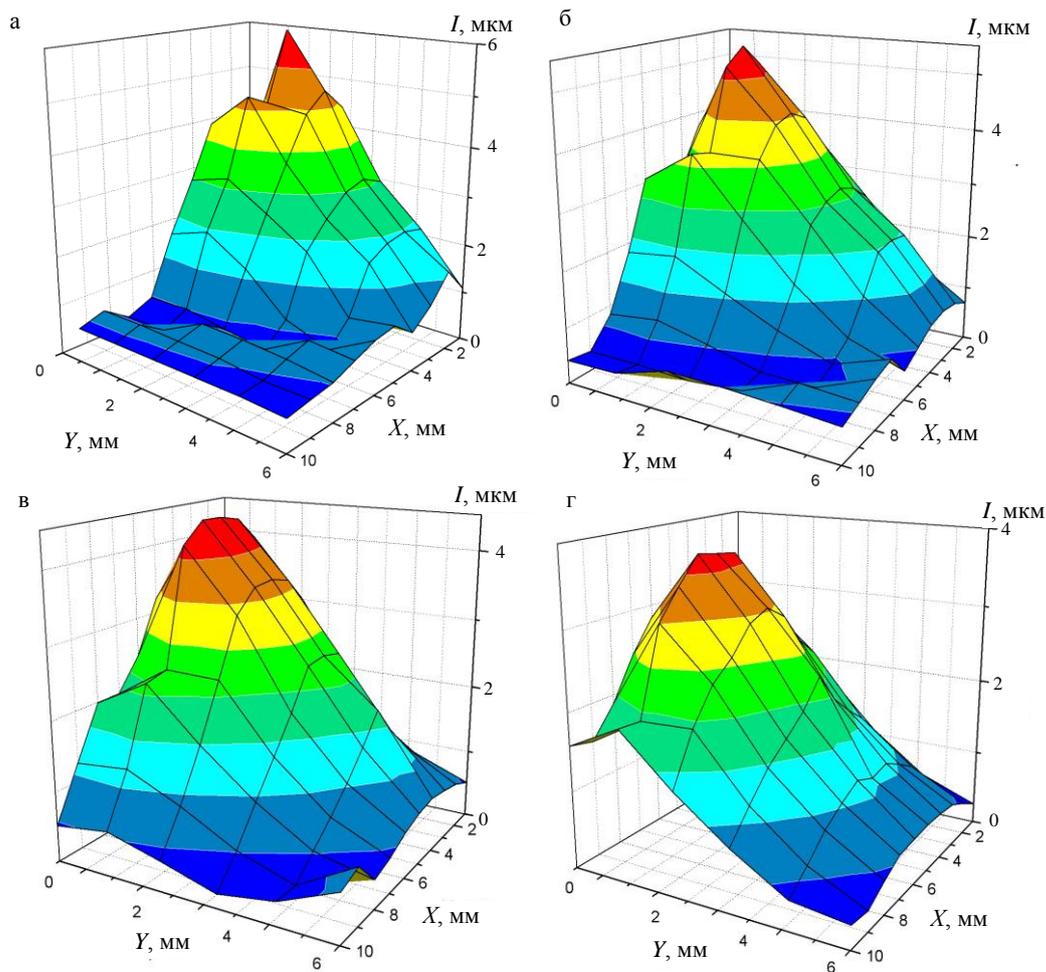


Рис. 5. Графики изменения значения общей неравномерности обработки при различных наборах исследуемых параметров: а – $S = 10$ мм; б – 2; в – 30; г – 40 мм

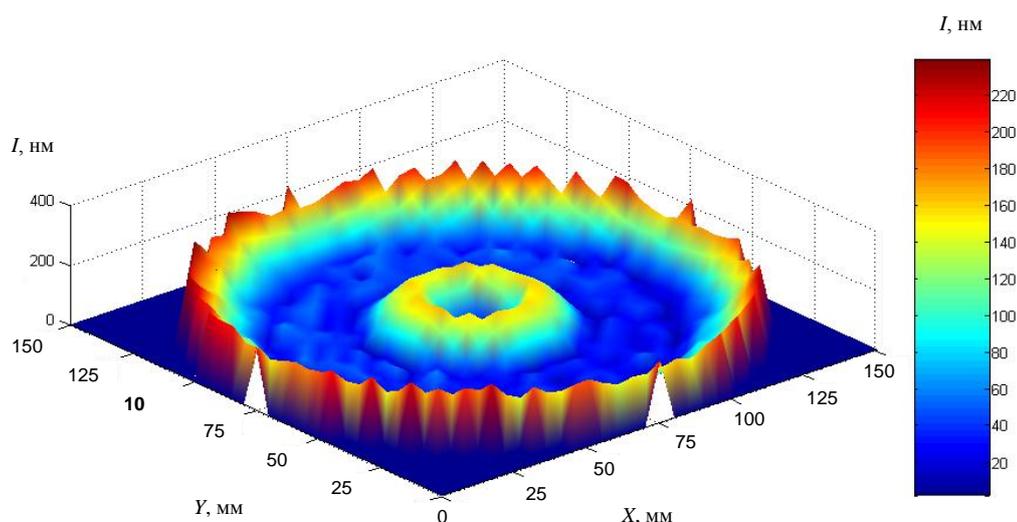


Рис. 6. Топограмма поверхности кремниевой подложки после моделирования магнитно-абразивного полирования в течение $T = 10$ мин

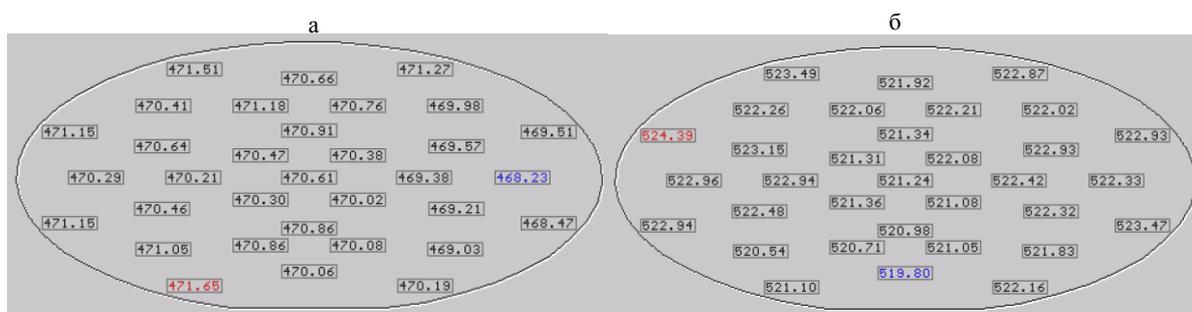


Рис. 7. Результаты измерений толщины кремниевых подложек после МАП с использованием следующих наборов оптимальных параметров: а – $X = 90$ мм, $Y = 10$ мм, $S = 25$ мм; б – $X = 90$ мм, $Y = 35$ мм, $S = 30$ мм

ВЫВОДЫ

1. Создана компьютерная модель, отображающая механизм движения инструмента и заготовки в зоне обработки с учетом заданного исходного набора геометрических и кинематических параметров, которая позволяет:

- рассчитывать суммарное время обработки и мгновенное значение относительной скорости перемещения выбранной опорной точки поверхности пластины в течение всего процесса обработки;
- получать радиальное распределение величины съема припуска в зависимости от времени обработки;
- строить топограмму поверхности, показывающую общую неравномерность обработки.

2. Разработана методика, позволяющая давать количественную и качественную оценку распределения съема припуска с поверхности кремниевых пластин диаметром 150 мм и более при магнитно-абразивном полировании.

3. Создано программное обеспечение, с помощью которого можно осуществлять поиск набора оптимальных значений наладочных параметров станка модели 3905: амплитуды возвратно-поступательного движения заготовки, расстояния между осями вращения инструмента и заготовки в начальный момент времени и поперечного смещения траектории движения пластины, с точки зрения получения наилучшей геометрии поверхности подложки.

4. Изготовлен экспериментальный образец станка для МАП плоских заготовок из различ-

ных материалов диаметром 5–250 мм и толщиной 0,1–40 мм.

5. Теоретически и экспериментально показано, что при магнитно-абразивном полировании кремниевых пластин величина общей неравномерности обработки изменяется в пределах 2–5 мкм.

Реализация большого технического потенциала метода МАП путем дальнейшего усовершенствования разработанной математической модели, оптимизации параметров процесса магнитно-абразивного полирования и изучения новых технических решений представляется весьма перспективной с точки зрения улучшения основных геометрических параметров кремниевых пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Новое** в технологии обработки пластин кремния большого диаметра для изготовления СБИС / Н. А. Большаков [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 2000. – Вып. 4. – С. 17–29.
2. **Особенности** обработки пластин кремния большого диаметра / С. В. Петров [и др.] // Электронная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 24–32.

3. **Peter Wolters GmbH**. Precision update. ISSUE 2/2007. P.4. <http://www.peter-wolters.com/>

4. **Хомич, Н. С.** Магнитно-абразивная обработка изделий / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.

5. **Magnetic-abrasive** machining of silicon-wafers a novel approach / M. Khomich [et al.] // Industrial Diamond Review. – 2004. – № 3. – P. 45–48.

6. **Preston, F. W.** The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / F. W. Preston // Journal of the Society Technology. – 1927. – № 11. – P. 214–256.

7. **Изучение** физико-химических процессов при формировании нанослоев и нанорельефа поверхности в условиях воздействия ферроабразивных частиц и магнитного поля с применением поверхностно-активных веществ: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. Н. С. Хомич. – Минск, 2003. – 52 с. – № ГР 20022378.

8. **Барон, Ю. М.** Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.

9. **Справочник** технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.]; под ред. М. А. Окатова. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

10. **SEMI M28-0997**. (Withdrawn 1000) Specification for Developmental 300 mm Diameter Polished Single Crystal Silicon Wafers. 2008 <http://www.semi.org/eu/Standards/StandardsPublications/index.htm>

Поступила 24.04.2008

УДК 629.7.01

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТЕРМОСИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Докт. физ.-мат. наук ЧИГАРЕВ А. В., асп. МИРОНОВ Д. Н.

Белорусский национальный технический университет

Проблема диагностики и прогнозирования состояния сложных механических систем в течение эксплуатации является всегда актуальной. Особенно она важна при эксплуатации систем, для изготовления которых необходимо большое количество материальных, временных и интеллектуальных затрат и от безотказности которых непосредственно зависят жизни людей и состояние других материальных ценностей. Одним из примеров таких систем является авиационный двигатель. Сложность проблемы заключается в оценке и учете всех динамиче-

ских и температурных нагрузок, действующих на рассматриваемую механическую систему с учетом многих факторов [1].

На практике изготовители предпочитают указывать несколько заниженный ресурс изделия, который в процессе эксплуатации может быть ими продлен. Эксплуатирующие организации заинтересованы в реализации всего запаса прочности и надежности изделия заложенного конструкторами при изготовлении. Для этого необходимо иметь на вооружении современные методики, позволяющие после проведения