

УДК 621.7:622.372.3

Т.Б. Теплова, А.С. Коньшин, В.В. Соловьев, Е.Е. Ашкинази

**О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ПРОЦЕССА МИКРОШЛИФОВАНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛА ЛЕЙКОСАПФИРА**

Семинар № 3

Объектами контроля в микроэлектронике являются близко расположенные друг к другу микроскопические структуры, выполненные в виде тонкопленочных рисунков или в виде газофазовых гетероэпитаксиальных многослойных структур на плоской подложке.

Основной тенденцией с помощью которой микроэлектроника достигает новых показателей это минимизация размеров отмеченных структур. Геометрические размеры элементов определяют заданные параметры и свойства приборов, а отклонения размеров приводят не только к отклонениям технических характеристик, но и к потере работоспособности. Неуклонное совершенствование микроэлектронных приборов сократило минимальные размеры элементов до субмикронных величин, а плотность их упаковки на плоской подложке на несколько порядков. Очевидно, что такое резкое уменьшение размеров элементов и увеличение плотности их компоновки предъявило повышенные требования и к качеству обработки, и прежде всего к ее режимам.

Перспективным монокристаллическим материалом идеально отвечающим требованиям предъявляемым к плоским подложкам для микроэлектроники является лейкосапфир [1].

Лейкосапфир является разновидностью корунда, представляет собой бесцветный прозрачный минерал, оксид алюминия Al₂O₃. Для технических целей применяют синтетический корунд. По данным ис-

следований, основные физические свойства синтетических корундов весьма близки к природным. Искусственно выращенные кристаллы лейкосапфира получают в виде пластин больших размеров с определенной заданной кристаллографической ориентацией. В отличие от широко используемых в микроэлектронике полупроводниковых монокристаллов, таких, как GaP, GaAs, InP, CdS, ZnS и другие, лейкосапфир отличают более высокие теплофизические свойства, анизотропия механических свойств, в частности модуля Юнга, значительно ухудшающих параметры обрабатываемости. Так в зависимости от кристаллографического строения модуль упругости E (1012 дин/см²) составляет: $C_{11} = 4,968$; $C_{33} = 4,981$; $C_{44} = 1,474$; $C_{12} = 1,636$; $C_{13} = 1,109$, теплопроводность (вт/см-град) перпендикулярно главной оси симметрии C : 0,23, параллельно оси C : 0,25, характеристическая температура $\theta_C = 935-950$, термическая диффузия (см²/сек) – 0,084, скорость звука (105 см/сек) – 10,92 по [1120]_l; - 5,0293 по [1120]_{ss}; 669 по [1120]_{fs}. [2]. Как видно из приведенных данных, анизотропию свойств лейкосапфира необходимо учитывать при взаимодействии монокристалла с обрабатывающим инструментом.

Существенное влияние на надежность и эксплуатационные характеристики монокристаллов для микроэлектроники оказывают изменения структуры и свойств поверхностных слоев, происходящих в процессе обработки. На отмеченные свой-

ства влияют, как жесткость крепления пластин на станке, так и параметры самой обработки.

Полупроводниковые микросхемы на лейкосапфировых подложках изготавливаются по эпитаксиально - планарной и диффузионно - планарной технологиям. В первом случае они реализуются на базе эпитаксиальных слоев, выращенных на подложках, выполняющих роль механического носителя, во втором случае, диффузия легирующих примесей осуществляется непосредственно в приповерхностную область подложек на заданную глубину. Качество поверхностного слоя подложек существенно влияет на структурное совершенство эпитаксиального слоя. Наличие дислокаций, микротрещин приводит к образованию дефектов в этих слоях, причем их плотность, как правило, выше, чем в подложках. Дислокации и дефекты упаковки прорастают с подложки и наследуют ее отрицательные свойства, ухудшая эксплуатационные свойства микросхем.

Дислокации и точечные дефекты при диффузионно-планарной технологии, способствуют локальному ускорению диффузии легирующей примеси, что приводит к искривлению фронта р-п перехода и появлению на нем иглообразных выступов, которые являются зонами с повышенной напряженностью электрического поля, обуславливающими возникновение токов утечки, шумов и пробоев приборов.

Традиционными способами обработки лейкосапфира является шлифование и полирование. При необходимости снятия больших припусков с деталей используется шлифование связанным абразивом, когда обработка ведется на режимах с максимально возможной производительностью. Согласно [3] рост скорости удаления материала обеспечивается за счет большого числа абразивных зерен на производящей инструментальной поверхности, а улучшение качества обработки - за счет снижения усилий резания единичными зернами инструмента. Для этого ширину алмазонасного слоя делают значительно

большей обрабатываемой поверхности пластины и обработка производится только при вращении инструмента и его подаче на врезание по всей обрабатываемой поверхности. Так в [4] во время шлифования обрабатываемая пластина закрепляется на столе станка, а инструмент диаметром 410 мм вращается с частотой 1450 об/мин и подается на деталь в соответствии с предварительно заданной программой. Применяются [3] алмазные чашечные круги АЧК на связке М1 с размером зерен 125/100, 100/80 мкм концентрацией 100 %, марка алмаза АС15, АС20, АС32, скорость инструмента 5 м/сек. При этом достигается шероховатость поверхности Ra менее 0,6 мкм, а глубина нарушенного слоя составляет $h = 11$ мкм. Скорость удаления припуска может достигать 1000 мкм/мин.

Механизм и физическая сущность процесса финишной обработки лейкосапфира инструментом с закрепленными зернами алмазных микропорошков показаны в работе [5]. Как полагает В.И. Чукаев, данный процесс адекватен процессу трения скольжения двух соприкасающихся твердых тел. Взаимодействие этих поверхностей имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Молекулярное взаимодействие обусловлено адгезией двух твердых тел (инструмента и обрабатываемого изделия). При этом может иметь место схватывание пленок, покрывающих дискретно контактируемые поверхности, и их разрушение или поверхностей с сопровождающимся вырыванием материала. Механическое взаимодействие сопровождается взаимным внедрением элементов сжатых поверхностей, упругим, пластическим оттеснением или срезом материала. Отделение же обрабатываемого материала происходит не в результате микрорезания, а в основном в результате малоциклового усталостного разрушения. При этом обрабатываемый материал обтекает внедрившиеся зерна без отделения основной массы. Каждый выступ образует перед собой волну, деформируя материал. Он сжимает его перед зерном и растягива-

ет впереди гребня волны, особенно за зерном за счет силы трения. Таким образом, каждое сечение поверхности обрабатываемого материала последовательно подвергается сжимающим и растягивающим напряжениям. Повторно действующая нагрузка на поверхность приводит к ее усталостному разрушению, которое не устраняется пленкой смазки, так как смазка лишь выравнивает нагрузку. Если единичная неровность рабочей поверхности инструмента погрузится на глубину, превышающую порог внешнего трения, то будет наблюдаться процесс съема стружки микрорезанием. При финишной обработке лейкосапфира алмазным инструментом зернистостью 7/5 мкм на некоторой глубине от поверхности возникают большие пластические деформации и дефектный слой глубиной 15–25 мкм, а также слой некоторой толщины с повышенной плотностью растровых одиночных дислокаций по сравнению с остальным объемом монокристалла, которая уменьшается по мере удаления от поверхности. Следовательно, шлифование можно идентифицировать при обработке лейкосапфира, как микрорезание (скальвание), а полирование, как износ при пластическом контакте (малочиковое усталостное разрушение)

Одним из наиболее простых и высокопроизводительных методов получения поверхности высокого качества является абразивное полирование [3].

При полировании абразивные частицы в составе суспензии или пасты подаются на полировальник из материала более мягкого, чем обрабатываемый монокристалл. Частицы обладают достаточной степенью свободы, хотя их перемещение по полировальнику ограничено в большей степени, чем свободного абразива при шлифовании. Оба процесса имеют одинаковые закономерности, обусловленные механическим действием абразива, в то же время полирование является одним из трудоемких процессов из-за низкой скорости удаления материала.

Наиболее производительный съем лейкосапфира при полировании соответствует следующим режимам: при предварительном полировании съем составляет 0,4 мкм/мин, обработка ведется на сукне алмазным зерном 5/3 мкм на часовом масле при давлении $1,5 \cdot 10^{-2}$ кгс/мм², при тонком полировании – обработка ведется алмазным зерном 1/0 мкм на часовом масле на сукне при таком же давлении, съем составляет 0,1 мкм/мин. Основным недостатком алмазного полирования монокристаллов является наличие большой глубины нарушенного слоя.

Одним из эффективных способов уменьшения глубины нарушенного слоя является химико-механическое полирование при котором механически удаляется не основной материал пластины, а промежуточный слой, образованный за счет химического действия жидкостей. Процесс травления можно подразделить на следующие элементарные стадии: диффузию анионных и катионных комплексов на поверхности кристалла, образование и удаление адсорбированного соединения с поверхности кристалла, причем скорость всего

процесса зависит от параметров лимитирующей стадии.

Данный метод нельзя признать до конца изученным, поскольку, даже когда известны основные реакции, протекающие на поверхности между кристаллом и агрессивной средой, подбор состава последней, как для процессов травления, так и химико-механического полирования является сложной задачей, не имеющей в настоящее время научно-обоснованных критериев выбора. Отсутствие универсальных технологий обработки монокристаллов, отвечающих современным темпам усовершенствования электронных компонентов современных средств радиоэлектроники, космической и военной техники требует применения индивидуального подхода в выборе режимов, исключающих нарушение критических контролируемых параметров изделий.

Одним из способов механической обработки твердых минералов и кристаллов является шлифование в режиме пластичности. На шлифовальной установке, обладающей достаточной жесткостью и высокой точностью, позволяющей обеспечить малый съем материала и малую врезную подачу возможно создать условия для шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. При малой глубине резания и низких врезных подачах все хрупкие материалы могут обрабатываться в режиме пластического течения, а не хрупкого разрушения.

В результате заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме, при этом обеспечивается чистота обработки поверхности, ранее достижимая только в нерегулируемых процессах, осуществляемых в режиме пластичности, таких как полирование и притирка.

Сущность процесса микрошлифования в режиме пластичности целесообразно изучать на основе физической мезомеханики, разработанной академиком РАН В.Е. Паниным, связывающей движение дислокаций на микромасштабном уровне с интегральными механическими характеристиками процессов, происходящих на макромасштабном уровне, с учетом состава материала, его внутренней структуры и условий нагружения. Особенно важным является то обстоятельство, что закономерности движения структурных элементов на мезоуровне и движения дислокаций на микроуровне подчиняются закону подобия [6].

В.Е. Паниным установлено [6], что физическая основа модели пластической деформации в мезообъемах состоит в том, что в результате внешнего воздействия периодических касательных напряжений в кристалле возникают сильные статические смещения атомов из узлов кристалличе-

ской решетки. Согласно этой модели в каждой точке деформируемого объема ансамбль дефектов эстафетно сдвигается только по одной системе плоскостей скольжения, близко соответствующей направлению максимальных касательных напряжений.

Теоретически и экспериментально было обосновано, что рассматриваемый на микроуровне сдвиг, как элементарный акт пластического течения, на самом деле сопровождается поворотными модами деформации на более высоком мезоскопическом масштабном уровне.

Новизна предлагаемых технологических решений [7] основана на модели пластической деформации кристалла в мезообъемах при шлифовании, которая состоит в следующем. При внешнем упорядоченном воздействии ритмичного поля в виде периодических касательных напряжений в упругой обрабатываемой системе (УОС) шлифовального станка динамическому воздействию со стороны режущих зерен вращающегося инструмента подвергается обрабатываемая поверхность (ОП) на площади макромасштабного уровня. При этом в период синхронного накопления усталости преимущественно к возвратно-поворотным модам деформации формируется однослойная ячеистая структура в виде множества трехмерных мезообъемов. Эти мезообъемы движутся в релаксационном режиме по схеме «сдвиг + материальный поворот». В конце периода синхронного накопления усталости исходная монокристаллическая структура преобразуется в поликристаллическую структуру одновременно срезанную со всей указанной площади в виде множества единичных пластически деформированных частичек основного кристалла с формированием при этом бездефектной структуры приповерхностного слоя на обработанной поверхности.

Для формирования движущихся в релаксационном режиме мезообъемов, каждый из которых за время своей «жизни» непосредственно подвергается по крайней мере одноразовому внешнему импульсному воздействию со стороны вершины конкретного режущего зерна регулярного микрорельефа вращающейся производящей инструментальной поверхности (ПИП), необходимо обеспечить достаточную жесткость, высокую разрешающую способность и стабильность дискретных перемещений исполнительных органов УОС. Такая УОС реализована в шлифовальном станочном модуле с интеллектуальной системой программного управления (ПУ) модели АН15ф4.

В этом станке осуществляется динамическое импульсное воздействие зерен вращающейся ПИП на ОП кристалла, которое является результатом сложения двух векторов: вектора сжимающего напряжения, определяемого потенциальной энергией сжатия и вектора касательного напряжения, определяемого кинетической энергией. Основные параметры станочного модуля приведены в статье [8].

Применение тестовых методов в системе управления станочного модуля дает возможность не только диагностировать, но и прогнозировать состояние параметров резания путем математического анализа средствами персонального компьютера в системе числового программного управления (ЧПУ) станка взаимосвязи выходных параметров системы резания, как ответной реакции управления ее входными параметрами. При этом в качестве регулирующего воздействия используется интенсивность удаления припуска по определенному алгоритму, обеспечивающему получение заданных выходных параметров.

На станочном модуле с ЧПУ модели АН15ф4 обрабатывался монокристалл искусственного лейкосапфира цилиндрической формы диаметром 31,5 мм и высо-

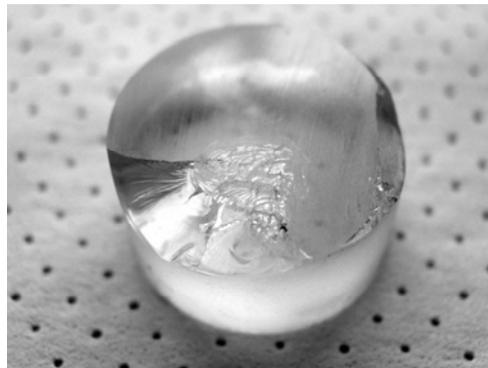


Рис. 1

той 16,8 мм (рис. 1). Обработка производилась с целью выбора рациональных режимов микрошлифования поверхности монокристалла лейкосапфира при различных скоростях движения стола станочного модуля и различных величинах врезной подачи.

Математическая модель диагностирования процесса микрошлифования позволяет сопоставить в реальном масштабе времени входные и выходные параметры этого процесса.

На основе информации о динамических и статических составляющих упругих деформаций в обрабатываемой системе такая технологическая диагностика позволяет обеспечить устойчивое получение заданных выходных параметров обработки за счет самонастраивающегося компьютерного управления режимами интенсивности съема припуска в каждой точке касания вершины режущего зерна производящей инструментальной поверхности с обрабатываемой поверхностью. Динамика состояния каждой конкретной упругой обрабатываемой системы в момент выхода ее на размерно-управляемый режим шлифования может быть прослежена из анализа осциллограмм. При этом возможна однозначная идентификация состояния параметров шлифования.

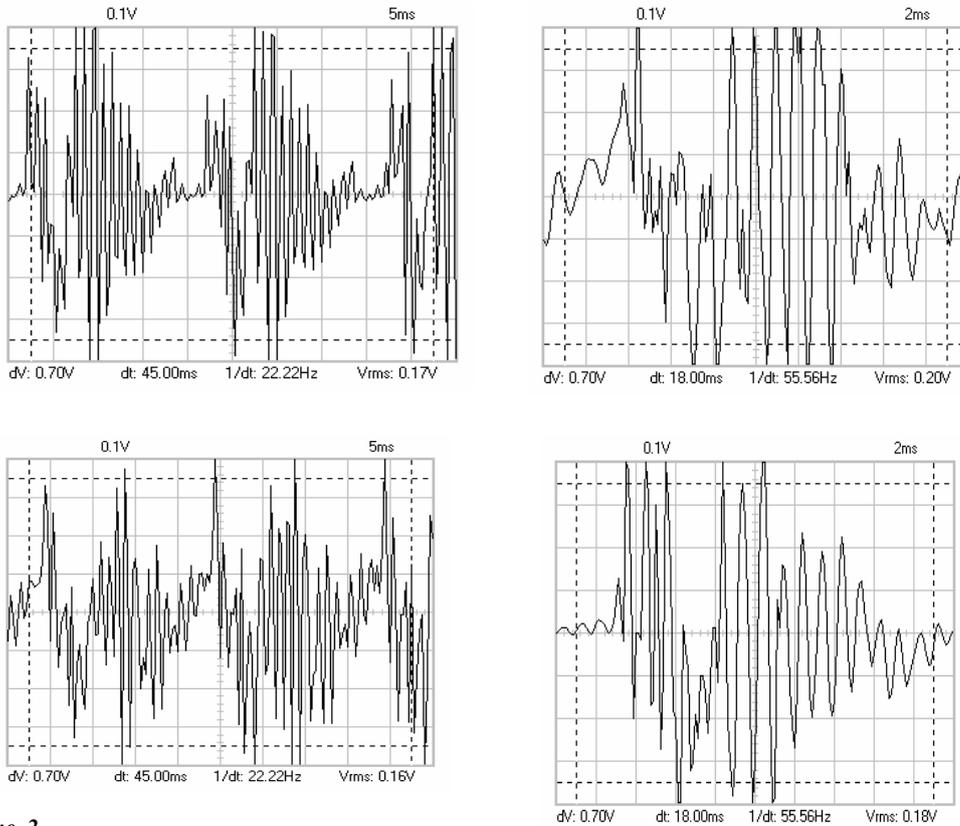


Рис. 2

При этом, в УОС устанавливается такой режим интенсивности съема, при котором имеет место периодический характер состояния взаимного соответствия (баланса) в размерном и качественном выражении между множествами структурных трехмерных ячеек (мезообъемов). Эти мезообъемы с одной стороны находятся в стадии зарождения в них дислокационных структур под воздействием только поворотных мод деформации. С другой стороны, в момент их одновременного квазипластического срезания, которое происходит с частотой периодичности, определяемой временем жизни каждой отдельной ячейки из всего множества трехмерных структурных ячеек (мезообъемов), появляется возможность идентифицировать протекание дискретного процесса съема припуска (в области квазипла-

стической деформации) с образованием множества единичных квазипластически деформированных стружек по наличию автоколебательного характера изменений сжимающих упругих деформаций в обрабатываемой системе. При установившемся режиме квазипластического резания со стационарными режимами интенсивности съема скорость врезной подачи в направлении сжимающих упругих деформаций системы равна отношению между линейными размерами мезообъемов и временем их жизни до отрыва. И при этом имеет место автоколебательный характер динамической составляющей сжимающей упругой деформации обрабатываемой системы с амплитудой равной линейному размеру мезообъема и с частотой, соответствующей времени жизни этой системы.

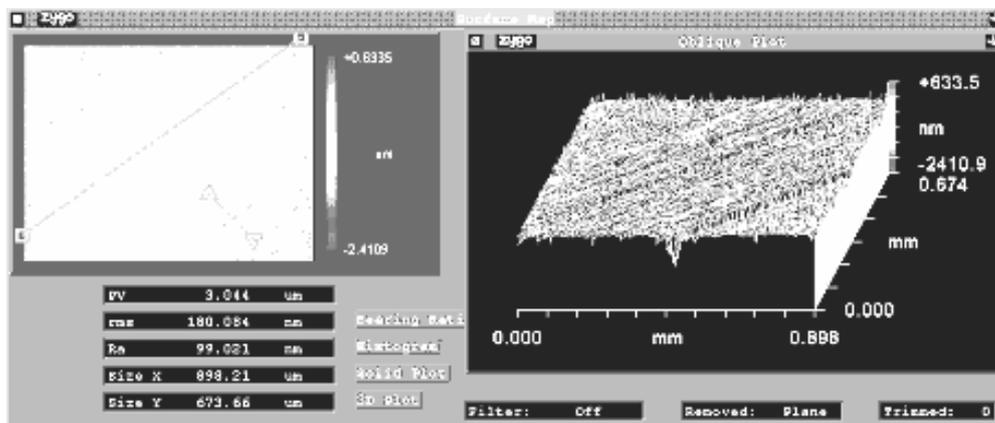


Рис. 3

В ходе экспериментальных исследований были получены осциллограммы динамической составляющей силы резания, анализ подтверждает принятую к реализации модель пластических деформаций в мезообъемах при удалении припуска. Наблюдение и запись осциллограмм проводилось на осциллографе «Vellaman» PCS64 с последующей их расшифровкой и физической интерпретацией. Осциллограммы процесса обработки показаны на рис. 2.

В ходе эксперимента определяют следующие параметры процесса микрошлифования: перемещение стола от реверса до реверса L , время перемещения стола от реверса до реверса τ , время нахождения кристалла в зоне резания за один проход стола τ_1 . Поскольку при съеме припуска по программе № 00002 со скоростью продольного прохода $14,6 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ произошел скол кристалла из-за повышенного нагрева обрабатываемой поверхности кристалла производилась в основном по программе № 0000, представляющую из себя выхаживание без врезной подачи.

Набор натяга происходил за счет теплового расширения кристалла. Для такого режима съема припуска была разработана методика расчета величины снятых порций поверхностного слоя лейкосапфира.

Эти результаты необходимы для получения заданных размерно-регулируемых параметров по шероховатости обрабатываемого кристалла. По разработанной методике общий объем снятого припуска определялся по общей фактической подаче после остывания кристалла за время общего съема. Полученные результаты усреднялись. Определялось время нахождения кристалла в зоне резания за время общего съема. После этого по осциллограмме определяют число максимальных пиков автоколебательного режима на стационарном участке, соответствующее количеству снятых порций в виде множества мезообъемов за время нахождения кристалла в зоне резания. По осциллограмме измеряют время t_1 между соседними пиками в автоколебательном режиме, соответствующее времени между дискретными съемами в виде отдельных порций с множеством мезообъемов в каждой порции на стационарном участке обработки.

Вычисляют V - среднюю скорость перемещения стола вдоль оси X . Усредняются и определяются количество порций с множеством мезообъемов в каждой порции за время нахождения монокристалла лейкосапфира в зоне резания за время общего съема. Исходя из снятого припуска и суммарного количества снятых порций материала с множеством мезообъемов в каждой порции вычисляют объем каждой

снятой порции лейкосапфира. Опираясь на проведенные ранее работы по шлифованию твердых материалах на станочном модуле с ЧПУ АН15ф4 предполагаемая шероховатость не более величины снятой порции материала [9]. После проведения шлифования алмазным кругом диаметром 250 мм на связке из костной муки с зернистостью 5-7 мкм было проведено измерение шероховатости.

Измерения проводились в ЦЕНИ ИОФ им А.М.Прохорова РАН на интерферометре белого света "Zigo" newview 5000, разрешение в плоскости объекта 0,45 мкм по оси Y - 1 А. Результаты измерений показаны на рис. 3.

Определение рациональных режимов обработки лейкосапфира и алгоритма такого микрошлифования делает возможным автоматизировать процесс производства лейкосапфировых подложек с получением поверхностей высокого качества. В свою очередь автоматизация процессов получения полированных поверхностей с нанометровым рельефом на пластинах из хрупких сверхтвердых материалов полупроводниковых структур позволит отказаться от сложной технологии химико-механической полировки в агрессивных средах и существенно повысить выход годной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коньшин А.С., Теплова Т.Б., Соловьев В.В. Особенности микрошлифования кристаллов лейкосапфира на станочном модуле с ЧПУ. ГИАБ №3. – М.: Изд-во МГГУ. 2005.
2. Каминский А.А. Лазерные кристаллы. – М.: Наука, 1975. - 256 с.
3. *Обработка* полупроводниковых материалов/В.И. Карбань, П. Кой, В.В. Рогов и др. - Киев: Наукова думка, 1982. - 256 с.
4. Brandt G. Neue Bearbeitungsmaschinen fur Halbleiter Materialien// Ind. Diamond Rdsch. - 1984. - Bd. 18. - S. 144-149.
5. Чукаев В.И. Исследование процесса финишной обработки синтетического корунда : Автореф. Дис. ...канд. техн. наук. - Л., 1974. – 24 с.
6. Панин В.Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. - Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
7. Коньшин А.С., Сильченко О.Б., Брайан Джон Сноу. Способ микрошлифования твердоструктурных материалов и устройство для его реализации. Патент РФ №2165837 от 27.04.2001. – С. 216.
8. Теплова Т.Б. Перспективы технологии размерно-регулируемого шлифования твердых высокопрочных материалов. ГИАБ №1. – М.: Изд-во МГГУ. 2005.
9. Теплова Т.Б. Обоснование рациональных режимов шлифования алмазов при их огранке. Авт.-реф. диссертации на соискателя ученой степени кандидата технических наук МГГУ, М., – 2002.

Коротко об авторах

Теплова Т.Б. – кандидат технических наук,
Коньшин А.С. – кандидат технических наук,
Соловьев В.В. – соискатель,

кафедра «Технология художественной обработки материалов», Московский государственный горный университет.

Ашкинази Е.Е. – кандидат технических наук, Центр естественно-научных исследований института общей физики им. А.М. Прохорова.

Результаты исследований земной поверхности территории рудника № 2 Стебницкого ГГХП «Полиминерал» и изучение материалов карстопроявлений за последние десять лет показывают, что наблюдается активное расширение и углубление провалов. Визуальные исследования провалов и карстовых пустот говорят об активизации процесса карстообразования. Все это подтверждает, что процесс карстообразования на руднике № 2 находится в стадии интенсивного развития, последствия которого могут быть весьма трагическими.

Комплекс геофизических исследований (электротометрия, гравиметрия) подтвердили наличие аномальных зон в гипсово-глинистой шапке (ГГШ) – зон разуплотнения. Причем распространение зоны имеет место по всей территории рудника № 2 и по глубине до добычных камер. В плане зоны разуплотнения имеют сложную форму, однако четко концентрированы вокруг карстовых провалов. Форма зон разуплотнения представляет собой эллипсоидные фигуры.

Полученные данные исследований позволяют выделить следующие виды карстовых образований:

- гипсовый карст в породах ГГШ;
- соляной карст в соленосных породах и руде.

Морфологически гипсовый карст может быть определен как кавернозность глазерит-мирабилитовых пород, которые вмещают гипс. Реже встречаются не большие по размерам полости на местах полостью растворенных гипсовых включений.

Соляной карст морфологически представлен:

- системой субгоризонтальных полостей, расположенных вдоль «соляного зеркала» – контакта соленосных пород и руд с корою их выветривания;
- субвертикальными полостями вдоль тектонических нарушений или контакта калийной руды с песчано-глинистыми прослоями

По условиям образования проявления карста могут быть природными и техногенными, которые образовались вследствие прорыва воды в рудник. Техногенный соляной карст целесообразно подразделить на произвольный и принудительный [1].

Природный карст образуется в породах ГГШ и на соляном зеркале вследствие естественной циркуляции подземных вод. Этот процесс, конечно, развивается очень медленно, поскольку плотность рассола больше плотности воды, которая инфильтруется и потому рассол на поверхности соляного зеркала остается практически недвижимым. Однако, наименьший градиент давления, обуславливающий приток воды в руднике, вызывает вдоль глинисто-песчаных слоев растворение солей и образование фильтрационных каналов. Режим водоносного горизонта кардинально меняется. В начале происходит дренаж статических запасов рассолов на соляном зеркале, после чего приток уменьшается. Вслед за этим начинается приток слабоминерализованных вод из пористого массива ГГШ и с поверхности, что растворяет соли вдоль путей фильтрации. В результате этого в ГГШ создается депрессия уровней воды, которая распространяется до достижения границ водоносного горизонта контура питания, практически выходящего на поверхность. После этого за счет инфильтрации поверхност-

Геолого-физическая модель развития солевого карста над горными выработками

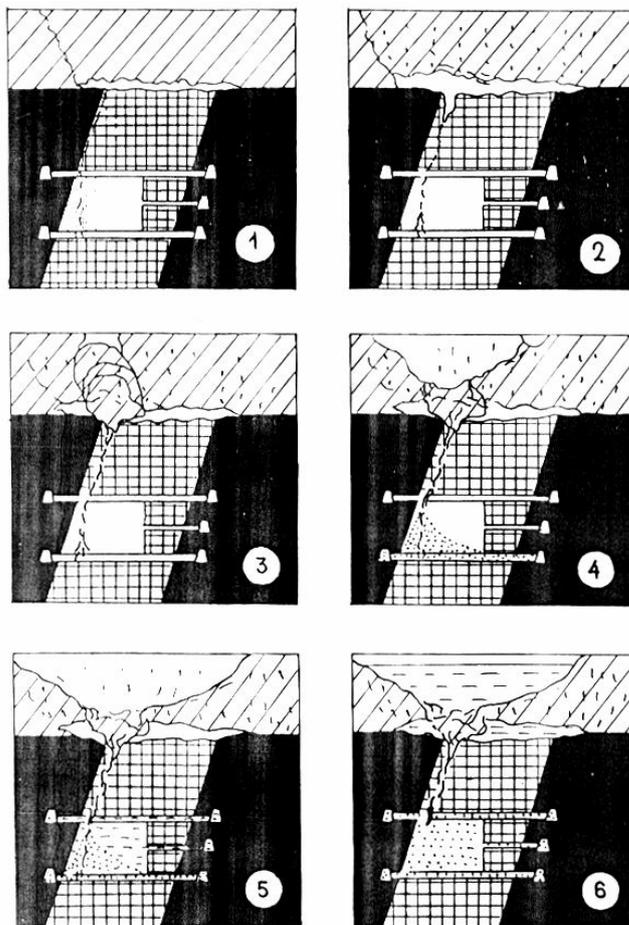
ных вод приток в рудник увеличивается за счет увеличения проницаемости тела ГГШ. На этой стадии образуются и четко выражены зоны разуплотнения. Причиной зонального разуплотнения в теле ГГШ является вынос в горные выработки нерастворимых частичек по большим субвертикальным постям.

Зона разуплотнения начинает развиваться от соляного зеркала «снизу-вверх» и достигает поверхности или нерастворимых слоев в ГГШ. Разуплотнение в горном массиве идет по двум видам: увеличение пористости или образование трещиноватости. Наступает момент предельного разуплотнения и достижения зоной поверхности – образуется провал грунта с выносом в камеры. Со временем края провала обваливаются, и образуется воронка. Деформационный процесс распространяется на прилегающие участки ГГШ, в которых развиваются разрушающие напряжения сдвига и разрыва.

Таким образом, на основе изучения генезиса карстообразований предлагается шести стадийная геолого-физическая модель соляного карста (рисунок).

1 стадия – раскрытие проницаемой зоны горными выработками. Проницаемые зоны наиболее часто приурочены к контакту калийных залежей с солями брекчий. Дебит рассола с высокой минерализацией увеличивается, рассол выходит из древней карстовой полости

2 стадия – образование грибовидной полости. С пород ГГШ отдельными каплями и ручейками стикает вода к соляно-



му зеркалу и фильтруется в направлении уклона к зоне проницаемости. Проницаемая зона расширяется и превращается в субвертикальную про-моину – ножку гриба. Минерализация рассола уменьшается вследствие гидроизоляции соляного зеркала нерастворимым остатком.

3 стадия – провал. Размеры полости достигают величины, когда нарушается устойчивость пород ГГШ, происходит обрушение кровли, по форме представляющей эллипсоид. Разуплотненные породы легко пропускают поверхностную воду вниз, что сопровождается растворением гипса в ГГШ. Обваленные породы заполняют полость в соляном отложении. Одновременно с растворением стенок начи-