

Государственный комитет СССР по народному образованию

ТРУДЫ МГТУ № 538

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Издательство МГТУ

1989

Государственный комитет СССР по народному образованию
ТРУДЫ МГТУ № 538

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
Сборник статей

Под редакцией Б.И.Белова



Издательство МГТУ
1989

ББК 34.42

Т38

УДК 658.512.2 681.2:531.7 621.317.7

Т38 Технология производства электронной аппаратуры :Сборник статей / Труды МГТУ под ред. Белова Б.И. - М.: Изд-во МВТУ, 1989. 154 с.

I S B N 5-7038-0091-9 Рецензенты:

Егунов А.В., Дюжиков В.И.

Ответственный за выпуск Куприянов С.О..

I S B N 5-7038-0091-9 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1989.

В В Е Д Е Н И Е

В центре практической деятельности нашей партии и народа находятся вопросы ускорения социально-экономического развития страны на основе научно-технического прогресса.

К основным направлениям, определяющим научно-технический прогресс в производстве электронно-вычислительных и радиотехнических средств относятся:

- автоматизация производства изделий микроэлектроники;
- автоматизация сборочно-монтажных работ электронных моделей,
- автоматизация технологической подготовки и управления сборочно-монтажным производством электронной аппаратуры.

В сборнике представлены результаты научных работ, выполненных на кафедре "Конструирование и технология электронно-вычислительных систем" МВТУ им.Н.Э.Баумана и приуроченных к 50-летию создания кафедры. Представленные работы отражают основные направления научной деятельности кафедры в области технологии изделий микроэлектроники, печатных плат и печатных узлов. Так работы К.Ф.Скворцова, Ю.И.Нестерова представляют результат по созданию управляемого технологического процесса полирования материалов электронной техники. Эти вопросы особенно актуальны для повышения эффективности и качества элементной базы ЭВА и РЭА. Результаты работы защищены десятками авторских свидетельств и патентов и внедрены в производство.

Работа Ю.Н.Новикова и С.О.Куприянова посвящена контролю параметров тонкопленочных покрытий, получаемых осаждением в установках вакуумного напыления. Работа представляет большой практический интерес для производства оптических покрытий и интегральных схем.

Работа Е.В.Кротовой дает рекомендации и методы по оплавлению покрытий олово-свинец в производстве печатных плат для разработки рациональных технологических процессов.

Работа К.И.Билибина и Г.М.Пьянова рассматривает проблему системного проектирования структур автоматизированного сборочно-монтажного производства печатных узлов на основе методов моделирования. Процесс проектирования предлагается решать на основе разработанной методики с использованием моделирующего комплекса.

ПОЛИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

I. Технологические возможности полирования

Полирование это, как правило, финишная операция технологического процесса, с помощью которой получают гладкие поверхности деталей с комплексом требуемых эксплуатационных характеристик.

Назначение полирования - декоративная отделка деталей; достижение высокой отражательной способности поверхностей, износостойкости, антифрикционных свойств, светопропускания, бездефектного поверхностного слоя, максимальной усталостной прочности и др. Кроме того, полированию подвергаются поверхности деталей, подлежащие нанесению покрытий. Для каждого случая микрогеометрия обработанных поверхностей должна быть оптимальной. Так, уменьшение шероховатости поверхности рабочих дорожек шариковых подшипников с $R_z = 0,8$ мкм до $R_z = 0,3$ мкм повышает их долговечность на 20 %, а при дальнейшем снижении R_z улучшения эксплуатационных характеристик не наблюдается [1]. Медные зеркала с шероховатостью поверхности $R_z = 0,1$ мкм имеют коэффициент отражения на 14- 20 % больше, чем при шероховатости $R_z = 0,4$ мкм. На отполированных полупроводниковых подложках интегральных схем наличие любого дефекта кристаллической структуры поверхностного слоя приводит к ухудшению электрических характеристик изделий, поэтому полирование должно обеспечить шероховатость поверхности $R_z < 0,032$ мкм и полное отсутствие поверхностного дефектного слоя [2]. Требования к отполированным поверхностям деталей, подвергаемых нанесению покрытий определяются назначением покрытий и методом их нанесения. Так, в случаях нанесения тонких пленок вакуумным или плазменным методами величина микронеровностей на подложках должна быть много меньше толщины пленки (0,1-1 мкм), при гальваническом нанесении покрытий достаточная шероховатость поверхности деталей не превышает $R_z = 0,1-0,4$ мкм, а для покрытий, осаждаемых химическим восстановлением металлов рекомендуемая шероховатость поверхности деталей $R_z = 1,5-6$ мкм.

Важнейшим фактором, определяющим свойства отполированной поверхности, является не только ее шероховатость, но и форма

микронеровностей, которая зависит от способа обработки. Именно она влияет на большинство эксплуатационных характеристик изделий - прирабатываемость, износостойкость, контактную жесткость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и др. Например, А.А. Маталиным установлено, что износостойкость втулок с шероховатостью $R_a = 0,6 \text{ мкм}$ наибольшая после шлифования, а при обработке с шероховатостью $R_a = 0,2 \text{ мкм}$ наименьший износ наблюдается у хонингованных втулок. А.Л.Честновым при исследовании влияния методов отделочной обработки на сопротивление поверхностного слоя стали ШХ15 изнашиванию при качении установлено, что при различной исходной шероховатости поверхности 0,045 мкм; 0,070 мкм и 0,240 мкм, полученных соответственно суперфинишированием, обработкой шкуркой М28 и электрополированием процессы прирабатываемости обработанных поверхностей существенно отличаются. Так, биения приработанных поверхностей в диапазоне от 10^4 до $2 \cdot 10^7$ циклов качения у электроотполированных образцов изменилось от 16 мкм до 10 мкм, у обработанных шкуркой - от 30 мкм до 20 мкм, а у суперфинишированных - от 30 мкм до 15 мкм. Следовательно, особенности микрогеометрии поверхности после электрополирования обеспечивают как более высокую стабильность поверхностных свойств так и лучшие по сравнению с другими методами обработки точностные характеристики пар качения.

Эксплуатационные характеристики обработанных поверхностей зависят также от характера рисок на поверхности - глубины и плотности их расположения. Единичные риски на поверхности являются концентраторами напряжения:

$$\alpha_r = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{r}}$$

где α_r - коэффициент концентрации напряжений в упругой зоне;

t - глубина риски; r - радиус закругления ее основания.

При наличии нескольких рядом расположенных рисок действие их как концентраторов напряжений снижается - добавочные риски способствуют более равномерному распределению напряжений, осуществляя взаимное разрушение концентраторов.

В этом случае $\alpha_r = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{r}} \cdot \gamma$, (2)

где γ - коэффициент, зависящий от отношения расстояния между

концентраторами S и их глубиной t .

С уменьшением S/t концентрация напряжений снижается, а при $S/t = 10$ совокупность рисок начинает действовать как единичная царапина [1].

Таким образом, лучшие эксплуатационные характеристики изделий получают обработкой, обеспечивающей создание равномерной сетки рисок на поверхности.

При достижении требуемых свойств поверхности и поверхностного слоя финишными методами обработки необходимо учитывать явления технологической наследственности - влияние на состояние поверхностного слоя предшествующих операций обработки. Характер и условия проведения предварительных операций обработки поверхностей во многом определяют окончательные свойства поверхности - микротвердость, структуру, химический состав, поверхностную энергию и др. При этом на финишных операциях имеет место сложный комплекс взаимодействия абразивных частиц со специфической для каждой предшествующей обработки структурой поверхностного слоя деталей, во время которого могут усиливаться либо ослабляться характерные искажения его структуры. Например, при одинаковом направлении действия сил на элементарную площадку поверхности во время нескольких последовательных операций обработки, включая финишную, искажения кристаллической решетки могут превысить предельные значения и произойдет зарождение и развитие микротрещин. Поэтому направления движения абразивных частиц на шлифованных, доводочных и полировальных операциях должны быть противоположными либо пересекающимися.

Напряженное состояние поверхностного слоя, определяющее эксплуатационные свойства деталей, существенно отличается на шлифовальных и полировальных образцах.

Шлифование на форсированных режимах вызывает появление растягивающих напряжений в поверхностном слое, снижающих усталостную прочность деталей, а полирование - образование напряжений сжатия, которые повышают усталостную прочность. Таким образом, для получения высококачественных изделий требуется полное удаление дефектного поверхностного слоя, сформированного на стадии шлифования.

Условие полного удаления полированием дефектного поверхностного слоя оставшегося от предшествующих процессов обработки

является необходимым для проведения большинства финишных операций.

При шлифовании монокристаллических подложек интегральных схем нарушенный поверхностный слой характеризуется большим числом структурных дефектов - микротрещин, дислокаций и др., плотность которых уменьшается от поверхности вглубь подложки, т.е. свойства поверхности по мере полирования дефектного слоя изменяются. Это обстоятельство приводит к необходимости изменения условий и состава суспензий для химико-механического

полирования монокристаллов. В начале полирования из-за опасности скалывания микровыступов, полирование ведут при низких давлениях и сильнощелочной среде. При удалении основного рельефного слоя давление повышают для увеличения скорости съема материала. Наконец, на завершающей стадии полирования вновь снижают давление и уменьшают щелочной показатель суспензии для предотвращения растравливания поверхностного слоя и обеспечения условий споллировывания дефектного слоя, оставшегося после шлифования без внесения собственных нарушений структуры. Удаление поверхностного дефектного слоя наиболее эффективно производить в несколько переходов полирования с уменьшением размеров абразивных частиц на каждом последующем этапе. В работе [3] предложена методика определения оптимального количества таких переходов :

$$f = \ln \left(\frac{S_0}{S_f} \right), \quad (3)$$

где S_0 - толщина дефектного слоя, подлежащего удалению;

S_f - размер абразивных частиц в суспензии на финишном переходе полирования. Выполнение условия (3) позволяет выполнить обработку за минимальное время T

$$T = f \frac{e}{\alpha}, \quad (4)$$

где α - технологический коэффициент, учитывающий условия полирования [с⁻¹].

Оптимальный размер абразивных частиц, применяемых на каждом переходе в этой методике определяется из условий:

$$S_n^2 = S_{n-1} \cdot S_{n+1} \quad S_0 = \frac{S_{n-1}}{\alpha}$$

где n - номер перехода.

Следует отметить, что принятое в данной методике допущение о необходимости одинакового времени обработки на каждом переходе и неполная определенность в зависимости коэффициента от ряда технологических факторов, не позволяет безоговорочно использовать предложенную методику. На практике бывает невозможно подобрать абразивные составы с расчетными размерами, перекладка деталей на другие станки на каждом переходе требует дополнительного времени, кроме того, глубина дефектного поверхностного слоя после каждого перехода зависит от комплекса факторов, а не только от размера абразивных зерен, как принято в данной методике.

В общем случае для получения требуемых поверхностных свойств полируемых деталей необходимо обеспечить оптимальные величину и характер шероховатости поверхности, и, в большинстве случаев, устранить структурные дефекты поверхностного слоя, оставшиеся от предшествующей обработки. Для этого рекомендуется осуществлять полирование при сложном относительном движении деталей и инструмента; для получения оптимального характера шероховатости следует выбирать соответствующие условия полирования - абразивный состав, давление, скорость и характер движения детали и инструмента, материал полировальника и методы полирования; проводить при необходимости многоступенчатую обработку поверхности обеспечивающую высокую производительность процесса и минимальные нарушения поверхностного слоя.

2. Способы и особенности полирования

Характерной особенностью абразивного полирования является использование субмикронных абразивных частиц в условиях их нежесткого взаимодействия с обрабатываемой поверхностью с одновременным воздействием на нее не абразивной компоненты полирующего состава. Механизм образования полированной поверхности до конца не выяснен и является предметом исследований ученых и в настоящее время. Согласно механической теории процесса полирования сглаживание поверхности происходит за счет актов срезания абразивными частицами микровыступов рельефа. В пользу этой теории говорит размерный износ при полировании, наличие микростружек в шламе, характер которых сходен со стружкой, полученной при шли-

фовании поверхностей, характерные дефекты на обработанной поверхности в виде сетки рисок [4]. Однако с механических позиций нельзя объяснить процесс полирования твердого материала более мягким, и наоборот - получения зеркальной поверхности при применении абразивного материала более твердого, чем материал полируемой детали.

По представлениям Б.Бейльби эффект полирования возникает за счет пластических деформаций поверхностного слоя обрабатываемого материала. При этом за счет сильного пластического течения этого слоя, происходящего при высоких температурах, возникающих при трении абразивных частиц об обрабатываемую поверхность, происходит перемещение материала из областей микровыступов и микровпадины. Сторонники этой гипотезы предполагали, что пластическое течение материала происходит либо за счет его оплавления [5], либо под действием тангенциальных сил со стороны полировальника. Во всех случаях предполагалось образование тонкого (5,0 - 10,0 нм) поверхностного аморфного слоя (слоя Бейльби-Боудена) на отполированных деталях.

Пластическое течение материала при полировании может иметь место не только при обработке сравнительно мягких металлов, но и при полировке таких хрупких материалов как стекло [6], кремнии [7] и др. Однако вопрос о наличии на полированной поверхности аморфной пленки металла является спорным. С позиций этой теории нельзя объяснить размерную обработку при полировании, кроме того нагрев участков обрабатываемых поверхностей в условиях применения абразивных суспензий да еще на полировальниках из мягких материалов представляется сомнительным.

Академик И.В.Гребенщиков считал, что в основе процесса полирования лежат явления физико-химического взаимодействия материала обрабатываемой поверхности и полирующей среды, сопровождающееся чередующимся образованием и разрушением поверхностных пленок на обрабатываемой поверхности.

В основе его теории полирования стекла лежат следующие тезисы:

1. Все силикатные стекла весьма энергично и быстро реагируют с водой, образуя на поверхности вследствие гидролиза кремнистых соединений коллоидную пленку кремниевой кислоты тол-

щиной от 1,0 до 6,0 нм, защищающую стекло от дальнейшего разрушения.

2. Пленка способна к адсорбции коллоидных частиц и электролитов вследствие обменных реакций.

3. Применяемый для полировки крокус является весьма дисперсным веществом, обладающим высокой адсорбционной способностью по отношению к ионам и коллоидным частицам.

Таким образом, при полировании стекла вода действует на шлифованную поверхность и покрывает ее защитной поверхностной пленкой. Крокус адсорбируется ее поверхностью, изменяя этим прочность прилипания пленки к стеклу, и одновременно адсорбируется поверхностью полировальника, являясь связующим веществом между полировальником и стеклом. Полировальник при своем движении срывает с выступов, оплавившихся после шлифовки стекла, пленку, и обнажившаяся свежая поверхность стекла быстро реагируя с водой, вновь покрывается коллоидной пленкой - происходит процесс удаления материала с микровыступов поверхности. Предельная точность полировки поверхности при этом определяется ничтожной толщиной пленки (около 2,0 нм), чем и обусловлена величина остающихся после полировки микронеровностей. Доказательством того, что процесс полировки заключается в срыве коллоидной пленки кремниевой кис-лоты, можно считать отсутствие на полированной поверхности сколько-нибудь заметной структуры или царапин в первых же стадиях полировки и резкое снижение производительности процесса (в 60-70 раз) при замене воды другой жидкостью, не способной создавать поверхностной пленки на стекле. Кроме того, установлено, что с увеличением химической стойкости стекла скорость его споллирования уменьшается.

Аналогичный механизм может иметь место и при полировании сталей, на которых образуются оксидные или солевые пленки, срываемые абразивными частицами.

Несмотря на глубину теоретической проработки и большой подтверждающий экспериментальный материал химическая теория полирования не объясняет вею полноту явлений, происходящих при полировании. Так полирование сталей в инертной среде, исключающее протекание активных химических процессов, незначительно уменьшает скорость полирования сталей [8].

Высокая механическая прочность и упругость поверхностных

смазочных пленок на металлах часто не допускают непосредственного физического взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью при полировании. При этом сглаживание микронеровностей происходит за счет их пластической деформации под слоем поверхностных пленок [1].

В работе [9] предложена так называемая лепестковая теория износа, согласно которой при скольжении твердого тела по поверхности с достаточно большой силой трения на незначительном расстоянии от поверхности происходит скопление дислокаций с наибольшей плотностью. Это приводит к зарождению микропустот, которые, сливаясь генерируют микротрещины параллельные поверхности и приводящие к отделению частиц материала с поверхности. Очевидно, это явление может иметь место в некоторых случаях полирования. При полировании хрупких монокристаллов пластические деформации могут приводить к образованию микротрещин, например, в областях пересекающихся систем скольжения [10], которые развиваясь, определяют сьем материала с поверхности. Кроме этого в процессе полирования могут вносить свой вклад усталостное разрушение под действием циклически изменяющихся сил [11].

Э. Рабинович [12] при исследовании механизма полирования привел ряд экспериментальных опровержений основных положений рассмотренных теорий и утверждает, что процесс полирования происходит за счет молекулярного отделения частиц с обрабатываемой поверхности под действием абразивных частиц. Условием протекания такого процесса является низкая энергия в системе абразив - обрабатываемый материал, при которой слабые адгезионные связи на поверхности не в состоянии при разрыве образовывать крупные частицы износа.

Эта теория имеет некоторое сходство с теорией Гребенщикова. Общим является предположение о молекулярном отделении вещества с поверхности. Отличие состоит в том, что согласно химической теории отделяющиеся частицы вначале входят в состав оксидных или солевых пленок и лишь после этого отрываются от поверхности, а по молекулярной теории отрыв частиц обусловлен адгезионными связями между движущимися с разной скоростью абразивными частицами и поверхностью деталей.

По современным представлениям в процессе полирования имеет место абразивное механическое разрушение поверхностного слоя

пластическое течение материала, в том числе и образование и развитие микротрещин и химическое воздействие полирующего состава на обрабатываемый материал, причем химически реагировать с обрабатываемым материалом могут не только неабразивная составляющая полирующего состава, но и его твердая фаза.

Химическое и электрохимическое полирование поверхностей основано на преимущественном растворении микровыступов поверхностного слоя деталей и, как правило, производится без механических воздействий на обрабатываемую поверхность. При химическом полировании это достигается применением соответствующих травителей, которые обеспечивают диффузионный характер процесса растворения, когда лимитирующей стадией этой гетерогенной реакции является стадия диффузии молекул травителя через приповерхностный слой продуктов реакции и ингибиторов к основному материалу.

Химическим полированием достигается шероховатость обрабатываемых поверхностей до $R_a \approx 0,06$. Наибольшее распространение этот метод получил для обработки деталей из алюминия и его сплавов, нелегированных сталей, меди и ее сплавов.

Типовые составы и режимы химического полирования приведены в таблице 1.

При электрохимическом полировании преимущественное анодное растворение микровыступов происходит из-за меньшей толщины прианодного "вязкого" слоя на этих участках, что объясняет диффузное прохождение в электролит ионов металла из растворяющегося поверхностного слоя детали, являющейся анодом в электрохимическом процессе. Шероховатость обработанных поверхностей достигает

$R_z \approx 0,06$ мкм. Метод успешно применяется для полирования деталей из алюминия и его сплавов, сталей, меди и ее сплавов, драгоценных металлов, тугоплавких металлов и др.

Типовые составы и режимы электрохимического полирования приведены в таблице 2 [13].

Условием электрополирования является необходимость превышения сопротивления электролита сопротивлению материала деталей. Это ограничение особенно затрудняет электрополирование полупроводниковых пластин, имеющих низкую электропроводность - вынуждает применять высокоомные электролиты, малую плотность тока и,

Таблица I

Растворы и режимы химического полирования деталей

Материал	Состав ванн	Температура (°C)	Длительность (мин)	Примечание
I	2	3	4	5
Алюминий и его сплавы	H_3PO_4 - 74-82% (по массе)	90	I-5	Для полирования сплавов типов AM_r ; AM_u
	HNO_3 - 2-4%			
	H_2O - 10-14%	100	I-4	Скорость съема металла 3,75 мкм/мин. В качестве смазывающего вещества добавить 0,05% карбоксилметилцеллюлозы (ванна Алуполь)
	II H_3PO_4 - 77,5% (по массе)			
	H_2SO_4 - 15%			
HNO_3 - 6%				
$Cu(NO_3)_2$ - 0,5%	55-75	15-20	Съем металла 2,5-5 мкм. Применять для алюминия высокой чистоты (ванна Эрфтверк)	
HNO_3 - 13-14% (по массе)				
NH_4F - 16%				
$Pb(NO_3)_2$ - 0,02%	до 100	0,6-I	Для полирования сплавов	
IV H_3PO_4 - 90 г/л				
HNO_3 - 100 г/л				
$Cu(NO_3)_2$ - 9 г/л				
$NaNO_3$ - 90 г/л	90-95	2-5	Для полирования силуминов, сплавов AM_r	
V H_3PO_4 - 300 г/л				
CH_3COOH - 250 г/л				
HNO_3 - 410 г/л				
	Борная кислота - 40 г/л			

I	2	3	4	5
Сталь низкоуг- леродистая	H_2O_2 (30%-ная) - 13г/л $H_2CO_3 \cdot 2H_2O$ - 25г/л H_2SO_4 - 0, 1г/л	20	30-60	Скорость съема металла 1,7 мкм/мин
Сталь углеро- дистая	H_3PO_4 - 32% (по массе) H_2SO_4 - 17-50% HNO_3 - 7-15% HCl - 1, 5%	100	0,5	
Сталь (мелкие детали часовой и оптической промышлен- ности)	H_3PO_4 - 88% (по массе) H_2SO_4 - 12%	200	до нес- кольких минут	
Медь и ее спла- вы	А H_3PO_4 (пл. I, 75) - 65% (объемн.) CH_3COOH (ледяная) - 20% HCl - 15% Б H_3PO_4 (пл. I, 7) - 550мл CH_3COOH (ледяная) - 250мл HNO_3 (пл. I, 4) - 200мл Тиомочевина - 0, 2 г	60- 70 20- 25	 2-6	Для полирования меди, латуни. Съем металла - 25-40 мкм Для полирования меди, мельхиора, нейзильбера. Реко- мендуется пока- чивание деталей
	В HNO_3 - 500 г/л H_2SO_4 - 250 г/л $NaCl$ - 10 г/л Г HNO_3 - 65 мл H_3PO_4 - 30 мл CH_3COOH - 5 мл $NaCl$ - 1 г Вода - 5 мл	18- 85	0, I	Для полирования бронзы, латуни, меди Для полирования бронзы

1	2	3	4	5
Никель	H_2SO_4 - 100 г/л HNO_3 - 300 г/л H_3PO_4 - 170 г/л CH_3COOH - 500 г/л	85- 95	0,5-1	Никель можно полировать в растворах для латуни и нейзильбера
Серебро	$NaCN$ - 21 г H_2O_2 (30%-ная) - 78г H_2O - 1 л	38	периодически по несколько секунд	Выдержка деталей в растворе до начала газо-выделения, затем промывка в воде, и вновь полирование
Бериллий	H_2SO_4 - 5% (по массе) H_3PO_4 - 75% CxO_3 - 7% H_2O - 13%	50	несколько минут	Скорость съема 1 мкм/мин
Тантал	H_2SO_4 (пл. 1,84) - 50мл HNO_3 (пл. 1,4) - 20 мл HF (техн.) - 20 мл	20	6-10 с	
Магний	CxO_3 - 18% (по массе) $Ca(NO_3)_2$ - 41% MgF_2 - 0,25% H_2O - 77,75%	68- 86	0,5-5	Изделия не тускнеют после промывки в 5%-ном растворе метасиликата

Таблица 2
Электролиты и режимы полирования материалов

Материал	Состав электролита	Температура (°C)	Плотность (А/дм ²)	Примечания
I	2	3	4	5
Алюминий	Na_2CO_3 - 15-30% (по массе) Na_3PO_4 - 5-10%	80-90	5-6	Хорошо полируется чистый алюминий
	II HBF_4 (2,5%-ная)	30	2-6	Напряжение 10-25 В. Требуется охлаждение ванны
	III H_2SO_4 - 4-45% (по массе) H_3PO_3 - 40-80% C_2O_3 - 0-2% Al^{3+} и Cr^{3+} - до насыщения	70-95	2,5-10,0	Напряжение 7-15 В. Для полирования технического алюминия и деформируемых сплавов
Стали	I H_3PO_4 - 70% (по массе) H_2SO_4 - 12% C_2O_3 - 9% H_2O - 9%	65-75	35-50	Рекомендуется для углеродистых сталей. Скорость съема до 0,01мм/мин
	II H_3PO_4 (пл. I, 71) - 44% (по массе) глицерин (пл. I, 25) - 56%	100	7,8	Для деталей из нержавеющей сталей

I	2	3	4	5
	Ш H_3PO_4 (пл. I, 7) - 1000 мл желатина - 10 г - 40 г - 15 г	20	8	Для деталей из углеродистой стали
	IV H_3PO_4 (пл. I, 7) - 1000 мл желатина - 1 г	20	10-20	Для деталей из пружинной стали. Напряжение 15 В.
Стали	У HNO_3 (пл. I, 42) - 1000 мл HF - 100-360 мл $H_2C_2O_4$ - 20-40 мл H_2O - 600 мл	20-50	140-160	Для быстрорежущих сталей
Никель	H_2SO_4 (пл. I, 6)	35	40	Не рекомендуется для никелированных изделий
Серебро	$K[Ag(CN)_2]$ - 30-40 г/л KCN - 15-45 г/л K_2CO_3 - 25-60 г/л	18-25	2-3	Необходимо прерывание тока через 3-4 с
Золото	KCN - 67,5 г $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ - 15 г H_3PO_4 - 18,5 г NH_4OH - 0,9 г	60		Необходимо сильное перемешивание электролита
	II CH_3COOH - 10 г/л H_2SO_4 - 3 г/л $C_6H_5NH_2S$ - 25 г/л	25-45	1,5-3,5	
Медь и ее сплавы	H_3PO_4 (пл. I, 55)	20	6-8	Для полирования меди, латуни, бронзы
	H_3PO_4 (пл. I, 8) - 350 мл C_2H_5OH - 620 мл	20	2-7	Для сплавов

1	2	3	4	5
Медь и ее сплавы	H_3PO_4 (пл. I, 8) - 350мл H_2SO_4 (пл. I, 84) - 54мл	60-65	22-65	Для полирования латуни
Цинк	H_3PO_4 (пл. I, 8) - 500мл C_2H_5OH - 500мл	20	1,5-2,5	
Цинк	C_2O_3 - 160г H_2O - I л	18-30	90-110	Для цинковых сплавов
Кадмий	$HClO_4$ (пл. I, 6) - 200мл $(CH_3CO)_2O$ - 800мл	Менее 35	60-100	
Олово	$HClO_4$ (пл. I, 48) - 63мл CH_3COOH (ледяная) - 300 мл	25	9-15	Необходимо перемешивание раствора
Свинец	HBF_4 - 200 мл H_2SO_4 (пл. I, 84) - 20мл H_2O - 780 мл	20-40	400-700	Для свинца и его сплавов
	$HClO_4$ (пл. I, 61) - 350мл $(CH_3CO)_2O$ - 630 мл H_2O - 20мл	менее 30	9-12	
Магний	H_3PO_4 (пл. I, 8) - 350мл C_2H_5OH - 625 мл	20	0,5	В начале процесса наблюдается сильное газовыделение
	$HClO_4$ 25% (по массе) $(CH_3CO)_2O$ - 75%	20-30	0,5-10	Для сплавов $Mg-Mn$ $\gamma_a = 10 \text{ A/дм}^2$, для сплавов $\gamma_a = 0,5 \text{ A/дм}^2$
Хром	H_3PO_4 (пл. I, 7) - 0,4% (по массе) H_2SO_4 (пл. I, 84) - 15% H_2O - 21%	22-120	70-150	для полирования хрома и его сплавов с титаном, вольфрамом, никелем
Вольфрам	$NaOH$ - 10-20% (по массе) H_2O - 80-90%	20	3-6	

I	2	3	4	5
Титан	$HClO_4$ (пл. I, 59) - 50 мл $(CH_3CO)_2O$ - 1000 мл	30	100	
Кобальт	HCl (пл. I, 19) - 500 мл C_2H_5OH - 500 мл	20	250	
Молибден	H_2SO_4 (пл. I, 84) - 25 мл CH_3OH - 175 мл	25	80-120	
Платина	$NaCl$ - 50 г KCl - 50 г	661		Напряжение I-3 В
Мельхиор	H_3PO_4 (37% по массе) глицерин - 56% H_2O - 7%		15,3	
Сплав $Al-Si-Mg-Mn(CH_3CO)_2O$	$HClO_4$ (пл. I, 47) - 215 мл 785 мл	18-20	1,8	
Нимоник	CH_3COOH (ледяная) - 450 мл $HClO_4$ (пл. I, 6) - 40 мл H_2O - 15 мл	25	10	
Нейзильбер	H_2SO_4 - 33-50% (по массе) глицерин - 33-40% H_2O - 17-27%	30-60	20-40	
Электро-технические стали, пермаллой	H_2SO_4 - 10-25% (по массе) H_3PO_4 - 25-40% изопропиловый спирт - 30-40%			
Сталь, легкие сплавы, медные сплавы, свинец, цинк, олово	H_3PO_4 - 328 г/л CrO_3 - 372 г/л H_2SO_4 - 25 г/л HF - 33 г/л H_3BO_3 - 8,3 г/л лимонная кислота - 12 г/л фталевый ангидрид - 4,3 г/л	94	5-70	Плотность тока для стали - 17-40 А/дм ² , легких сплавов - 12-39 А/дм ² бронзовый - 18-24 А/дм ² , меди - 5-13 А/дм ² , свинца - 29-70 А/дм ²

1	2	3	4	5
				цинка-20-24 А/дм ² олова-7-9 А/дм ²
Алюминий и его сплавы, чугуны, стали, сплавов свинца, никеля, олова, цинка	$HClO_4$ (пл. 1, 2) - 200мл C_2H_5OH - 800 мл	35	100-400	Необходимо сильное перемешивание электролитов

следовательно, обеспечивает невысокую производительность. Повысить производительность процесса и качество поверхности позволяет импульсный метод электрополирования [14], уменьшающий пассивацию анода (детали) и позволяющий значительно повысить плотность тока в импульсе. Так при обычном электрополировании пластин из кремния в 2,5 Н растворе HF скорость съема не превышала $0,28 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{с}$, а при импульсном полировании в этом же электролите - $2,33 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{с}$ увеличением выхода по току с 5 % до 98 %.

Достоинствами химического и электрохимического полирования являются отсутствие поверхностного нарушенного слоя на обработанных деталях, возможность полирования сложнопрофильных поверхностей. Однако эти методы не позволяют получить высокую точность геометрических параметров деталей и, как правило, ухудшают значения неплоскостности, некруглости и другие характеристики.

Устранить этот недостаток можно применением дополнительного механического воздействия на обрабатываемую поверхность в процессе электро- или химического полирования. Такое воздействие может осуществляться мелким мягким абразивом или просто материалом полировальника в случае обработки простых сплошных поверхностей - плоскостей, сфер, цилиндров и т.п. При этом механически удаляются продукты реакций с участков макровыступов поверхности, облегчается поступление агрессивных сред к этим участкам,

Проведенные исследования химического полирования пластин из кремния в растворе, содержащем HF ; NO_3 и CH_3COOH показали, что при использовании исходных круглых пластин диаметром 40 мм

сполирования слоя толщиной 30 мкм неплоскостность обработанной поверхности достигала 40 мкм, в то время как при полировании в условиях непрерывного скольжения обрабатываемой поверхности по перфорированному плоскому диску из фторопласта после снятия такого же припуска неплоскостность не превышала 6 мкм.

Электрохимическим полированием абразивной суспензией, содержащей (Г/дм³): виннокислый натрий - 15; фосфорнокислый натрий - 10; хромовый ангидрид - 3; окись хрома - 200 обрабатывают пластины из сплава 36НХТЮ и достигают шероховатости $R_z = 0,04$ мкм, неплоскостности < 3 мкм при режимах полирования: - плотность тока $J = 0,35-0,4$ Д/дм²; скорость движения пластин по полировальнику $U = 2,1$ м/с; скорость съема 1-2 мкм/мин; давление $P = (3+9) \cdot 10^3$ МПа на полировальнике из искусственной замши.

Анализ методов полирования и существующих представлений о механизме образования гладкой поверхности дает возможность целенаправленно изменять роль различных процессов, протекающих при полировании, для получения требуемых эксплуатационных свойств деталей и обеспечения высокой производительности обработки. С этих позиций все составы для полирования можно разделить на 5 групп, отличающихся активностью не абразивной (дисперсионной) и абразивной (дисперсной) составляющих:

- 1) Системы с неактивной дисперсионной средой.
 - 2) Системы с химически активной дисперсионной средой.
 - 3) Системы с химически или трибохимически активной дисперсной средой.
 - 4) Системы с химически активной дисперсной и дисперсионной средами.
 - 5) Химически активные жидкости и смеси не содержащие твердой фазы.
- К составам 1-го типа, например, относится суспензия, применяемая для полирования сапфира: . . ; вода - 90%, КОН до pH - 10; глицерин - 2%. $\omega - Al_2O_3 - 10 \%$

В этом случае щелочной характер дисперсионной среды не является активной, она не реагирует ни с сапфиром, ни с абразивом. Съем материала осуществляется чисто механическим путем и сопровождается образованием рисок, выемок и др.

Управлять свойствами данного полирующего состава довольно сложно, т.к. уменьшением размера твердых частиц приводят к возрастанию числа стадий обработки, а увеличение интенсивности съема

путем увеличения концентрации твердой фазы ограничено устойчивостью дисперсионной системы» т.к. при концентрации частиц Al_2O_3 более 10 % происходит агрегатирование и седиментация системы. Попытка повысить агрегативную и седиментационную устойчивость системы применением ПАВ (глицерина) приводит к уменьшению производительности процесса полирования из-за адсорбционного снижения прочности частиц абразива [15].

Такие ограничения характерны для всех дисперсионных систем с неактивной жидкой фазой.

Примером систем с химически активной дисперсионной средой являются щелочные суспензии на основе окислов ZnO_2 и SiO_2 для полирования кремния. В таких системах на поверхность кремния воздействует щелочь, а твердые частицы механически удаляют продукты реакции и часть основного материала. На мягких полировальниках реакция идет не только на микровыступах, но и в микровпадинах, что приводит к длительному сокращению микрорельефа, что требует удаления слоя значительной толщины и длительного процесса полирования.

Управлять свойствами системы можно несколькими методами:

- 1) увеличением концентрации твердой фазы. Однако при этом характерны все ограничения, описанные для систем 1-го типа;
- 2) Увеличением химической активности среды, например, добавлением этилендиамина или других компонентов. Этот путь позволяет существенно повысить производительность процесса, но требует специальных мер техники безопасности.

В таких системах абразивное воздействие оказывает положительный эффект только до того момента пока не удален нарушенный слой от предыдущей обработки, а далее начинает быть причиной образования нового нарушенного слоя.

Уменьшение размера абразивных частиц приведет к нарушению равновесия между химическим и механическим воздействием на материал подложек и сдвигу гетерогенной реакции в диффузионную область. Таким образом, дисперсионные системы с активной жидкой фазой также не обеспечивают бездефектной поверхности подложек.

К дисперсионным системам 3-го типа можно отнести полирующие составы на основе золь и гелей коллоидной кремнекислоты, например, системы для полирования сапфира золями SiO_2 с концентрацией твердой фазы до 50 % и $pH=(7+12)$.

Так как твердость SiO_2 значительно ниже сапфира, его абразив-

ное воздействие исключается. Так же исключается химическое взаимодействие с дисперсионной средой, поэтому сьем сапфира (5-20 мкм/м) обусловлен только трибохимическим воздействием SiO₂ с сапфиром.

Управлять производительностью такого процесса можно изменяя температуру системы, дисперсность фазы, ее концентрацию.

Процесс механохимического полирования позволяет получить бездефектную поверхность.

При механохимическом (трибохимическом) полировании кинетика процесса будет определяться соотношением минимальной механической энергией E_m^* , необходимой для разрыва связей и среднего уровня избыточной энергии ΔE_m

Константа скорости включает коэффициент А, отражающий скорость перераспределения энергии в системах.

$$K = A \exp\left(\frac{E_m^*}{\Delta E_m}\right), \quad (7)$$

Особое влияние на протекание процесса будет оказывать дисперсность твердой фазы, т.к. ее повышение приводит к увеличению свободной поверхности энергии и, соответственно, к повышению ее химической активности.

Для дисперсных материалов свободная поверхностная энергия

$$W_{1-2} = \sigma_{1-2} \cdot S_{1-2} \quad (8)$$

где W_{1-2} - суммарная межфазная энергия на границе: дисперсная фаза (1) - дисперсионная среда (2) (эрг.);

σ_{1-2} - уд.поверхностная энергия на границе дисперсной фазы и дисперсионной среды, эрг/см²;

S_{1-2} - суммарная поверхность раздела фаз, см².

С увеличением дисперсности суммарная поверхность раздела увеличивается и увеличивается поверхностная энергия до достижения молекулярной степени дисперсности.

Максимальная активность твердой фазы достигается в коллоидных растворах или золях в которых размер твердых частиц на 2-3 порядка меньше, чем в суспензиях.

Участие таких частиц в механическом сьеме материала ничтожен, следовательно - механохимическую обработку можно считать безабразивной. Твердая фаза способствует изнашиванию полируемого материала, не оказывая на него механического воздействия. При этом за счет экстремальных условий в зоне контакта твердых час-

тиц с полируемым материалом протекает реакция, например, взаимодействия сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) с окисью кремния с образованием механически истираемых мягким полировальником алюмосиликатов.

Примером системы 4-го типа может быть состав на основе зольей кремниевой кислоты с $\text{pH}=(8-11)$ для полирования кремния. В таком составе с кремнием химически реагирует как дисперсионная составляющая, так и твердая фаза, при этом твердая фаза может также осуществлять чисто механическое воздействие на обрабатываемую поверхность, в частности, удаляя продукты реакции. Управлять процессом полирования в этом случае можно изменением свойств дисперсной и дисперсионной составляющих состава, изменением внешних факторов (температуры, давления, скорости движения подложек). Системы этого типа очень перспективны и могут обеспечить высокую производительность и совершенство обработанной поверхности. Они, по-видимому, найдут широкое промышленное применение после решения проблемы создания соответствующих составов, оборудования и ряда технологических вопросов.

Механизм и особенности химического полирования системами 5-го типа описаны выше.

3. Выбор способов, условий и режимов полирования

Способ полирования деталей определяется прежде всего следующими факторами: требованиями к качеству отполированных поверхностей (точность, шероховатость, качество поверхностного слоя), формой обрабатываемых поверхностей, материалом детали. Так, полирование плоских, сферических, цилиндрических, конических поверхностей наиболее эффективно производить абразивными суспензиями, пастами, полотнами. Эти способы позволяют получить высокую точность формы обрабатываемых поверхностей, производительность. Для снижения дефектности поверхностного слоя деталей целесообразно усиливать роль неабразивной составляющей процесса съема материала за счет химических или электрохимических явлений на обрабатываемой поверхности. Однако при этом следует учитывать возможность ухудшения точностных параметров формы поверхности. В абразивных процессах полирования оптимальные параметры эффективности и качества могут быть получены лишь при правильном выборе условий и режимов полирования - материала, зернистости и формы абразива, его количества, свойств неабразивной составляющей паст и суспензий,

свойств полировальника, давления, скорости и направления относительного движения детали по полировальнику, температуры, величины и формы тока при электрохимическом абразивном полировании и др. На все эти условия и режимы влияют характеристики материала детали - твердость, теплопроводность, химическая активность, электрическое сопротивление, степень анизотропии свойств в различных направлениях, состояние поверхностного слоя после предшествующих операций и др.

Абразивное полирование деталей со сложнопрофильными поверхностями затруднено или невозможно. В этих случаях целесообразно применять химическое или электрохимическое полирование. Условиями и режимами в этих случаях являются состав ванны, особенности закрепления или движения деталей в ванне, напряжение, величина и форма электрического тока, температура, длительность.

При выборе абразивных паст и суспензий для полирования, с точки зрения абразивной теории следует учитывать размер, форму и твердость абразивных частиц. Как правило, с увеличением их размера и твердости скорость съема материала возрастает, но одновременно увеличивается шероховатость и глубина поверхностного нарушенного слоя. В [16] установлено, что увеличение размера зерен от 0,4 до 1,0 мкм при полировании стекла приводит к пропорциональному увеличению скорости съема (от 0,01 до 0,08 мкм/мин). Это объясняется более глубоким внедрением крупных абразивных частиц в обрабатываемый материал, сопровождающимся срезанием или выкрашиванием из него более крупных частиц. Твердость абразива, по крайней мере, должна быть выше твердости полируемого материала.

Известны случаи полирования твердых материалов сравнительно мягкими абразивами. Так, в [17] рекомендуется полировать глазурь частицами агальматолита (пирофиллита) с твердостью менее 1 по Мо-осу; широко распространены процессы полирования граната, сапфира, карбида кремния и других монокристаллов относительно мягкими частицами окиси кремния. Указанные процессы возможны, когда полирование происходит за счет пластического течения поверхностного слоя (полирование глазури агальматолитом) или химических процессов на поверхности (полирование твердых монокристаллов окисью кремния).

Полирующая способность порошков определяется начальной формой абразивных зерен и динамикой ее изменения в процессе работы.

Предпочтительной, с точки зрения производительности, формой абразивных частиц является остроугольная пластинчатая. Высокая полирующая способность порошков будет долго сохраняться если дробление частиц будет сопровождаться образованием остроугольных осколков. Такая динамика формы частиц характерна для барнесайта, окиси тория, алмазов, в то время как для крокусов она выражается в притуплении и закруглении формы частиц. Объем сполитованного за 100 минут стекла крокусом, примерно в 5 раз меньше, чем борнесайтом.

Важным свойством абразивных зерен В.М.Винокуров считает также степень гидрофобности их поверхностей. Плохая смачиваемость жидкостью абразивных частиц и, следовательно, отсутствие между ними и полировальником жидкостной прослойки, улучшает сцепление абразива с полировальником и условия сполитования материала с деталей. Исследования, проведенные В.М. Винокуровым с различными абразивными порошками, показали, что увеличение гидрофобности порошка (краевого угла смачивания) во всех случаях приводит к возрастанию скорости полировки стекла. Наиболее эффективной является гидрофобизация порошков растворами, содержащими олеиновую кислоту.

Количество абразивных частиц в пастах или суспензиях также влияет на скорость полирования. Обычно скорость полирования линейно возрастает с увеличением количества абразивных частиц на полировальнике, достигая предела, обусловленного насыщением - образованием сплошного плотноупакованного слоя абразивных частиц. Например, для алмазной пасты АСМ 2/1 насыщение достигается при количестве зерен на полировальнике $17 \cdot 10^7$ шт/см² [11]. Важным является также однородность гранулометрического состава абразивных частиц в полирующих составах. Чем более гладкой должна быть обрабатываемая поверхность, тем меньше в абразивных составах должно присутствовать частиц предельных фракций.

При выборе абразивного материала обязательно следует учитывать свойства обрабатываемого материала. Если полирование керамики, закаленных сталей, кварца, чугуна и других твердых материалов выполняется составами на основе микропорошков карбида кремния, карбида бора, алмаза, то полирование сырой стали, меди, алюминия и их сплавов производят более мягкими материалами - окисью хрома, окисью алюминия, прокаленным глиноземом, трепелом, крокусом, электрокорундом.

Мягкие абразивные материалы на основе окислов металлов, осо-

бенно металлов с переменной валентностью способны оказывать на обрабатываемый материал химическое воздействие с образованием преимущественно на микровыступах поверхности окисной пленки, облегченное удаление которой улучшает качество полирования как мягких, так и твердых материалов. Глянцевание закаленных, коррозионностойких, углеродистых сталей, чугуна, алюминиевых и медных сплавов рекомендуется производить пастами на основе прокаленного глинозема. Полирование углеродистых, закаленных и коррозионностойких сталей, а также чугуна и алюминия производят пастами на основе окиси хрома, а для полирования медных сплавов рекомендуются пасты на основе крокуса и глинозема. Для механического полирования материалов радиоэлектронной промышленности (кремния, кварца, сапфира, рубина) широко используются алмазные пасты, полирование стекла производят составами на основе окиси хрома, крокуса, оксидов редкоземельных металлов.

Концентрация абразива в полировальных пастах достигает 10 % для алмазных и 70 % для остальных микропорошков. Оптимальная концентрация порошков зависит от их химической активности, твердости обрабатываемого материала и др.

Количество жидкости в полирующем составе должно быть достаточным для смачивания полировальника, абразивных зерен, микростружки. При низкой химической активности абразива или при обработке материалов с высокой твердостью в полирующем составе увеличивают концентрацию неабразивных ПАВ и химически активных веществ.

Оптимальное количество абразивных частиц в суспензиях в работе [1] предложено определять по максимуму коэффициента абразивного взаимодействия K_a :

$$K_a = \frac{n_z}{S \cdot V \cdot K \cdot t}, \quad (9)$$

где n_z - число зерен, попавших на элементарную площадку обрабатываемой поверхности;

V - скорость истечения суспензии, мл/с;

K - концентрация абразива в суспензии;

t - время переноса зерен через элементарную площадку, с.

При постоянном уменьшении количества жидкости в суспензии число абразивных зерен, контактирующих с поверхностью возрастает до оптимального значения, при котором достигается равновесие между числом зерен, вступающих в контакт с обрабатываемой поверх

ностью и отводящимися от нее. При этом значение K_d близко к максимуму. Обычно отношение количества жидкости (ж) и микропорошка (Т) в суспензиях изменяется в широких пределах от 2:1 до 60:1.

Жидкость в абразивных суспензиях должна обеспечивать транспортировку абразивных зерен в зону обработки с равномерным распределением их по поверхности, удалять вшам, препятствовать образованию конгломератов шлама, охлаждать полировальник и деталь, химически взаимодействовать с материалом детали для облегчения его удаления с поверхности. Эти функции могут быть реализованы, если жидкость имеет малую вязкость, большую теплоемкость, плохо смачивает полировальник и абразивные частицы, обладает достаточной химической активностью. В качестве жидкости в полирующих суспензиях используют воду, керосин, скипидар, спирт, машинное масло, ПАВ, щелочные растворы и др.

Б абразивных пастах неабразивная часть содержит смесь вспомогательных веществ, которые формируют жировую основу пасты, служат связующими веществами, химически активными добавками, растворителями. Это прежде всего стеариновая и олеиновая кислоты, церезин, парафин, костное, вазелиновое, машинное масла, говяжий жир, канифоль, солидол, пчелиный воск, петролатум, скипидар, керосин и др. Олеиновая и стеариновая кислоты выполняют прежде всего функции химически активных добавок, ПАВ и в некоторой степени смазок. Парафин, стеарин, вазелин, пчелиный воск, петролатум создают требуемую вязкость и служат загустителями паста, масла, жиры, керосин, скипидар, олеиновая кислота уменьшают поверхностную энергию материалов и облегчают условия диспергирования. Керосин, скипидар, бензин, дибутилфталат, этиленгликоль, асидон, глицерин, изопен, касторовое, костное, веретенное масла и др. служат растворителями и разбавителями в пастах. С увеличением вязкости пасты шероховатость обработанной поверхности возрастает [18]. Оптимальной считают вязкость паст 1-3 сет и плотность абразива $0,1-0,2 \text{ г/см}^3$. $(1 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с})$

Важным параметром материалов связок абразивных паст является температура испарения. При медленном испарении связки в составе абразива оказываются большое количество разрушенных и утративших свою режущую способность частиц, что приводит к засаливанию полировальника и снижению скорости съема. При слишком быстром испарении связки происходит преждевременное сбрасывание работоспо-

собных частиц с полировальника.

Пасты должны легко удаляться с обработанной поверхности, минимально засаливать полировальник.

В работе [1] рассмотрено влияние различных веществ в составе пасты на ее качество и приведены рекомендации по выбору ПАВ.

Сведения о различных абразивных и неабразивных материалах, входящих в состав полировальных паст и суспензий приведены в [1, 16]. Физико-химические свойства основных абразивных материалов приведены в таблице 3.

В таблицах 4-7 приведены некоторые рекомендуемые составы паст для полирования различных материалов.

Пасты ГОИ широко применяются в оптико-механической промышленности. Номер пасты соответствует ее абразивной способности (нормальной фракции зерен окиси хрома). Кроме паст ГОИ на основе окиси хрома выпускаются стандартные пасты а состав которых введен парафин (62-65 % окиси хрома и 35-38 % органической основы).

Особый интерес представляют водорастворимые пасты, так как их использование существенно упрощает последующую очистку деталей. Например, паста, предложенная Я.Я.Ковалинским, содержит 65-75 % по массе абразивного порошка, 20-22 % крахмального клейстера, 8-15 % мыльной воды, полученной растворением 25 г ядрового мыла в 1 л воды. Очистка обработанных деталей производится в воде при 30-40°C. В работе [1] приводится рецепт пасты для полирования лакокрасочных покрытий: аэросил 4-10 % по массе; препарат ОС-20 марки В 4-7 %; отбеленный воск - монтан 3-13 %, парафин 3-7 %, церезин 1-3 %, масло веретенное 1-4 %, смазка "Нефте-аз-204" 1-3%; оксидифанил 0,5-1 %, уайт-спирит 30-32 %, вода - 25-41,5 %.

для полирования цветных металлов может использоваться водорастворимая паста, содержащая (% по массе): окись хрома - 29,5; микропорошок М10-29,5; глицерин - 5; вазелин - 4; мочевины - 1; оксэтилированный алкинфенол - 1; 60 %-ное хозяйственное мыло - - 16; воду - 14.

Водорастворимые пасты имеют гораздо более сложный состав по сравнению с обычными. Кроме того их использование может вызвать коррозию обрабатываемых металлов, для предотвращения которой в состав паст следует вводить присадки-ингибиторы коррозии. Однако существенные технологические преимущества применения водорастворимых паст обуславливают актуальность задачи их более широкой

Таблица 3

Физико-механические свойства абразивных материалов

Абразивный материал	Химическая формула	Твердость по Мсоу	Макротвердость, МПа	Плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^3$	Температура плавления или разложения К	Модуль упругости, МПа
Кварц	SiO_2	7,0	98-107	2,59	1883	10300
Корунд	Al_2O_3	9,0	186-216	3,95-4,10	2323	52000
Наждак	-	9,0	186-216	4,10	-	-
Карбид бора	$\text{B}_4\text{C}(\text{B}_{12}\text{C}_{13})$	9,3	363-441	2,55	1873	-
Карбид кремния	SiC	9,5-9,8	274-343	3,12-3,20	2473-2873	365000
Электрокорунд	Al_2O_3 (90977)	9,0	176-235	3,95-4,10	2323	52000
Крокус	Fe_2O_3	5,0-6,0	-	5,25	1838	-
Полирит	GeO_2	6,0-7,0	-	5,80-6,20	2973	-
Окись тория	ThO_2	6,5	-	9,7	3473	-
Двуокись циркония	ZrO_2	-	-	5,68	2973	-
Окись хрома	Cr_2O_3	9,0	-	5,21	2608	-
Алмаз	C	10,0	843-980	3,49-3,54	3973-4273	900000
Кубический нитрид бора	BN	-	784-882	3,50-3,54	3273	720000

разработки и внедрения.

Существенно повысить производительность полирования позволяет использование алмазных паст, характеристики которых приводятся в таблице 7.

Алмазные микропорошки выпускаются из синтетических алмазов марок АСМ и АСН (ГОСТ 9 206-80) и природных алмазов марок АМ и АН. Абразивная способность микропорошков АН и АСН на 30-40 % выше, чем микропорошков АМ и АСМ. У синтетических алмазов абразивная способность задается режимом синтеза, у природных - зависит от месторождения.

Особенно эффективно использование алмазных паст для полиро-

Таблица 4
Полировальные пасты

№ пасты	Абразив %	Неабразивные материалы, %													
		Стеариновая кислота	Олеиновая кислота	Мир технический	Парафин	Церезин	Канифоль	Пчелиный воск	Скипидар	Жирная кислота, фракция	Линная кислота, фракция более	Смазка УС-3	Гудронное сало	Петролатум	Вазелин технический
1. Окись хрома 73	73	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-
2. Окись хрома 80,3	80,3	17	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-
3. Окись хрома 75	75	15	2	6	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Окись хрома 70	70	-	5	3	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Глинозем 77	77	19	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. Окись железа 36	36	20	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Окись хрома 36	36	20	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Глинозем 55	55	30	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Окись хрома 8	8	30	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Окись железа 73,118,51	73,118,51	5,4	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9. Глинозем 65	65	10	-	-	-	-	8,02,5	-	-	-	-	-	-	-	-
10. Окись железа 36,8	36,8	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,2	-
Каолин 36,8	36,8	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,2	-
11. Окись железа 36,520,544	36,520,544	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Окись хрома 36,5	36,5	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12. Каолин 36,8	36,8	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,2	-
Окись хрома 36,8	36,8	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,2	-
13. Каолин 68	68	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-
14. Глинозем 35,6	35,6	8,8	-4,4	-13,4	-	-	-	2,2	-	-	-	-	-	-	-
Окись хрома 35,6	35,6	8,8	-4,4	-13,4	-	-	-	2,2	-	-	-	-	-	-	-
15. Венская известь 71,8	71,8	23,0	-1,5	-1,5	-	-	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-
16. Глинозем		35	-	3	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-
17. Окись хрома		40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17. Глинозем 17,0	17,0	14,4	-	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Окись хрома 53,0	53,0	14,4	-	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18. Окись хрома 64	64	23	4	-	8	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
19. Окись хрома 70	70	20	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20. Окись хрома 72	72	13	2	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21. Окись железа 73	73	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
23. Электрокорунд ЭВ М7-М14 70		-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-
24. Огарок колчедана 39,4			-												
Электрокорунд ЭВ М5-М3 39,4	7,8	-	2	9,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
25. Электрокорунд ЭВ М5-М3 50	6,5	-	4	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5
26. Окись железа 76,6	18,8	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-1,5	-	-	-	-
27. Окись железа 27 Окись хрома 38		-	-	1,5	-	-	-	2,2	-	-	-	-18,4	-	-	-
28. Меловая пудра или тальк 95		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
29. Меловая пудра или тальк 100		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30. Казельгур 65,3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31. Венская известь 71,8		-	-	-	23	1,5	-	2,2	-	-1,5	-	-	-	-	-
32. Венская известь 84,0		-	-	-	08										
33. Окись хрома 40 Сульфат бария 35		-	1,0	-	10	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34. Трепел 70,0		-	5	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35. Трепел 68		-	-	-	-	18	10	-	-	-	-	-	-	-	-
36. Сапфировая пудра 10		-	75	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37. Электрокорунд ЭВ М5 65,0	10,0	10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38. Электрокорунд ЭВ М3 50	40	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* - в состав пасты дополнительно входит 20% рабочего жира и 5% керосина

вания твердых хрупких материалов - керамики, кварца, сапфира, кремния, рубина и др. При полировании мягких материалов алмазные зерна шаржируют обрабатываемые поверхности, что ухудшает их эксплуатационные свойства. Алмазные пасты выпускаются: смываемые водой (В); смываемые органическими растворителями (О); смываемые водой и органическими растворителями (ВО); мазеобразные (М); твердые (Т). Абразивная способность алмазных паст в 2,5 - 14 раз выше чем у абразивных паст [19], а при полировании алмазно-абразивными пастами про-

Таблица 5

Применение нестандартных полировальных паст
для обработки различных материалов

Обрабатываемый материал	№ пасты из табл. 4
Коррозионная сталь	1, 2, 10, 22, 23, 30, 33
Углеродистая сталь	8, 11, 12, 16, 17, 18, 22, 23, 26, 37, 38
Алюминий и его сплавы	5, 7, 1, 15, 17, 19, 21, 24, 25
Медь и ее сплавы	1, 8, 9, 12, 13, 14, 16, 10, 22, 23, 26, 27, 30, 36
Хром	3, 4, 1, 2, 8, 10, 16, 17, 20, 26, 28, 29, 33, 36
Никель	1, 2, 4, 9, 15, 16, 17, 19, 26, 31, 32, 36
Цинковые сплавы	14, 17, 31, 32
Серебро	8, 12, 13, 15, 26, 30, 31, 32
Пластмассы	34, 35

Таблица 5

Составы паст ГОИ

Группа	Номер пасты	Содержание, % по массе						Стеарин
		Окись хрома	Силикагель	Расщепленный жир	Олеиновая кислота	Двууглекислая сода	Керосин	
Грубые	50	86	2	5	-	-	2	5
	40	85	2	5	-	-	2	5
	35	81	2	5	-	-	2	10
	30	81	2	5	-	-	2	10
	25	81	2	5	-	-	2	10
	20	81	2	5	-	-	2	10
Средние	15	80	2	10	-	-	2	6
	10	75	2	10	-	-	2	11
Тонкие	7	75	1,8	10	2	0,2	2	9
	4	73	1,8	10	2	0,2	2	11
	1	70	1,8	10	2	0,2	2	14

Таблица 7
Характеристики алмазных паст (СТ СЭВ 206-75*)

Зернистость	Концентрация алмазов			Цвет пасты
	Нормальная (Н)	Повышенная (П)	Высокая (В)	
60/48 40/28	8	20	40	Красный
28/20 20/14 14/10	6	15	30	Голубой
10/7 7/5 5/3	4	10	20	Зеленый
3/2 2/1 1/0	2	5	10	Желтый
0,7/0,3 0,5/0,1 0,3/0 0,1/0	2	5	10	Пасты не окрашиваются

* Пасты из субмикропорошков не предусмотрены СТ СЭВ 206-75.

Выпускаются в СССР по ТУ.

вания твердых хрупких материалов - керамики, кварца, сапфира, кремния, рубина и др. При полировании мягких материалов алмазные зерна шаржируют обрабатываемые поверхности, что ухудшает их эксплуатационные свойства. Алмазные пасты выпускаются: смываемые водой (В); смываемые органическими растворителями (О); смываемые водой и органическими растворителями (ВО); мазеобразные (М); твердые (Т). Абразивная способность алмазных паст в 2,5 - 14 раз выше чем у абразивных паст [19], а при полировании алмазно-абразивными пастами производительность и шероховатость обработанной поверхности зависят от длительности процесса из-за непрерывного

изменения свойств абразивной и неабразивной составляющих пасты, происходящих вследствие разрушения или затупления абразивных частиц, накопления шлама, разбавления неабразивной составляющей рабочей жидкостью (спирт, веретенное масло, керосин и др.). Все это приводит к изменению условий диспергирования материала детали - степени межмолекулярного физического и химического взаимодействия компонентов пасты с обрабатываемым материалом. Так, при доводке твердого сплава ВК6М алмазными пастами М5 и М10 съем материала в течение 1ой минуты был в 9-10 раз больше, чем в течение 13-ой минуты. Показателем происходящих изменений условий диспергирования является переменный характер тангенциальной силы сопротивления движению детали по полировальнику [19]. Недостаточные исследования процессов, происходящих в алмазно-абразивных пастах в процессе полирования различных материалов вынуждают экспериментально определять оптимальное время полирования и исходное количество пасты.

Важным фактором, определяющим эффективность полирования является правильный выбор материала полировальника, от которого зависят скорость съема материала детали, точность обрабатываемых поверхностей, шероховатость и состояние поверхностного слоя. В оптической промышленности для полирования стекла широко применяются смоляные полировальники содержащие сплавы канифоли, древесного пека и некоторые пластифицирующие вещества. Исследованию свойств смоляных полировальников посвящено ряд работ, систематизированных в [16]. Из их анализа и результатов собственных исследований В.М.Винокуров сформулировал требования к материалам смоляных полировальников:

1) модуль упругости материалов полировальников должен лежать в пределах $(1-3) \cdot 10^4$ кгс/см². При этих условиях обеспечивается передача необходимого условия со стороны абразивных зерен на обрабатываемую поверхность;

2) предел текучести смолы не должен более чем в три раза превышать срезающих усилий, возникающих при полировке $(0,98 \cdot 10^4$ дин/см² при полировке стекла с давлением 100 Г/см²).

Это условие обеспечивает приспособляемость поверхности полировальника к обрабатываемой форме стекла при наименьших деформациях за счет текучести, которые приводят к существенному снижению точности обработки.

С другой стороны срезающие усилия при полировании не должны превышать предел текучести смолы для предотвращения протекания пластических деформаций полировальника;

1) материал полировальника в процессе обработки должен "автоматически" создавать на своей поверхности микроструктуру, обеспечивающую хороший доступ полировальной суспензии к поверхности стекла;

2) материал полировальника должен плохо смачиваться жидкостью полирующей суспензии для облегчения закрепления в кем гидрофобных абразивных частиц.

Смоляные полировальники позволяют получить хорошие результаты при длительной полировке абразивными суспензиями, т.к. их поверхностный слой быстро насыщается шаржированными частицами абразива и, практически, не изнашивается.

Кроме того, такие полировальники легко принимают требуемую исходную форму, отличную от плоской.

В машиностроении и радиоэлектронном приборостроении широко применяются полировальники из тканых и нетканых материалов - войлока, сукна, фетра, замши, бязи, кожи, капронов, резин и различных синтетических материалов, которые закрепляются на жесткой основе или выполнены в виде эластичных кругов. Исследование свойств полировальников из сукна, войлока, кожи, резины, бутил- метакрилата, проведенные в начале 50^x годов Н.Н.Качаловым, Г.И. Кушуковой, П.Я.Болиным и другими авторами выявили ряд их преимуществ по сравнению со смоляными. Среди наиболее важных характеристик, влияющих на параметры процесса полирования отмечались прочность волокон на разрыв (сукно), плотность и толщина шерстяного волокна (войлок), модуль эластичности и износостойкость (резина, бутилметакрилат).

К современным материалам полировальников предъявляются требования высокой износостойкости; оптимального модуля упругости; оптимальной текстуры поверхности, обеспечивающей хорошие условия для закрепления абразивных зерен и подачи абразивных составов в зону обработки; оптимальной толщины, т.к. с увеличением толщины полировальников, закрепленных на жесткой основе, ухудшается форма обработанных поверхностей, а с уменьшением - возрастает шероховатость и глубина нарушенного поверхностного слоя; химической стойкости в агрессивных полирующих средах, отсутствие испарений,

нежелательных для электронного приборостроения химических элементов. Для обработки деталей машиностроения из металлов и сплавов наиболее распространены полировальники из войлока, фетра, сукна; в точном электронном приборостроении - полировальники из искусственной замши, искусственной кожи СП-1, капрона, материалов типа " *Politex* ", " *Polivel* ". Перспективно использование многослойных полировальников, сочетающие требуемые упругие свойства и текстуру поверхности - сукно Моншен, трехслойный полировальник с металлическим средним слоем и др.

Полировальные круги представляют собой эластичный инструмент с закрепленными абразивными частицами или с нанесенной полировальной пастой.

Их выполняют из фетра, войлока, различных тканей, прессованной бумаги, резины, пластмассы, кожи. Войлочные круги по толщине ворса делят на грубошерстные, полугрубошерстные и тонкошерстные. С уменьшением толщины ворса повышается качество обработанных поверхностей. Тканевые круги могут быть дисковыми (непрощитыми), секционными и наборными (прошитыми) и специальными.

Дисковые круги, отличающиеся повышенной жесткостью, получают склеиванием отдельных полотен. Секционные круги, состоящие из отдельных кусков тканей прошивают разнообразными способами. Прощитые круги лучше удерживают абразив на поверхности. Наборные круги состоят из сегментов, полученных из сложенных вчетверо тканевых дисков. Сегменты вставляют друг в друга до получения плотноупакованного диска и прошивают. Складки между сегментами хорошо удерживают полирующую пасту. Такими же свойствами обладают гофрированные круги, полученные из полосы материала, свернутой в виде спирали. Бумажные круги получают из сшитых и спрессованных листов гладкой или гофрированной бумаги. Они обладают большей жесткостью и применяются для получения более шероховатых поверхностей ($R_z = 3-7$ мкм). Абразивные зерна приклеивают к рабочим поверхностям круга, накатывая их на поверхность с предварительно нанесенным слоем клея. Применяется и одновременное накатывание на круги абразивной пасты, содержащей абразивные частицы и клей (мездровый, силикатный, жидкое стекло). Специальные круги выпускают из эластичной резины, пенопластов, перопластов и других синтетических материалов. Перспективны разработка и применение полировальных кругов выполненных из пластмасс, в

структуре которых содержатся абразивные частицы [20]. Разработаны алмазные полировальные круги, исходным материалом которых служит смесь терморезистивных и термопластичных пластмасс и алмазных зерен от АСМ 3/2 до АСМ 60/40, которые успешно используются для полирования деталей из твердых спеченных сплавов.

Важнейшим условием получения высокой эффективности процесса полирования является правильный выбор его режимов - прежде всего давления и кинематических факторов исполнительных механизмов станков, определяющих величину и законы изменения скорости и ускорения относительного движения детали по полировальнику. Исследования влияния режимов абразивной доводки на производительность и качество изделий изложены в работах Н.И.Богомолова, П.Д. Дудко, В.Н.Морозенко, П.Н.Панасова и других авторов выявили сложное и противоречивое влияние отдельных параметров режимов доводки деталей на их качество и производительность процесса. Лишь комплексные исследования, проведенные в МВТУ им.Н.Э.Баумана под руководством П.Н.Орлова позволили выявить основные закономерности взаимовлияния условий и режимов доводки на величину съема материала. Например, для процесса доводки керамики ЦМ322 природным или синтетическим микропорошком АСМ 20/14 получено уравнение регрессии [19]:

$$\Sigma Q = 55,1 + 6,7Pr + 9,0p + 3,4V + 6,7pV, \quad (10)$$

где ΣQ - суммарный объем материала;

Pr - природа алмаза;

p - давление;

V - скорость относительного движения детали по притиру.

Из уравнения (10) следует, что наиболее значимым фактором является давление p. Так, увеличение давления в 2 раза при низкой скорости V приводит к возрастанию съема, примерно в 1,85 раза. Увеличение скорости в 2 раза при давлении p = 0,1 МПа увеличивает съем в 1,55 раза, а при давлении p = 0,2 МПа аналогичное увеличение скорости V наоборот снижает съем в 1,3 раза.

Сила сопротивления движению детали по притиру **F** также определяется сложной совокупностью факторов. Например, для довод-

ки деталей из спеченного твердого сплава ВК6М алмазными пастами АСМ5/3-АСМ40/28 уравнение регрессии имеет вид:

$$F_o = 1,64 + 0,14П + 0,29p + 0,21v + 0,07Пp - 0,08pv. \quad (11)$$

Здесь также наиболее значимым фактором является давление P .

Отмеченные зависимости объясняются особенностью протекания физических явлений, на которых основан процесс доводки свободным абразивом. При изменении давления и кинематических факторов меняются во-первых условия разрушения абразивных зерен, находящихся в жестком контакте с притиром и обрабатываемой деталью и, во-вторых, в некоторой степени изменяется механизм разрушения обрабатываемого материала - условия пластического течения, может произойти охрупчивание материала и др. Существенные различия в свойствах обрабатываемых материалов абразива, материалов притиров и кинематических факторов, присущих различным станкам, не позволяет выявить однозначные зависимости характеристик процессов доводки от условий и режимов ее проведения.

Процессы полирования абразивными составами отличаются от доводки прежде всего отсутствием жесткого контакта абразивных частиц с материалом детали и полировальником, благодаря эластичным свойствам последнего. Очевидно, что, например, повышение давления при полировании не приведет к значительному росту сил контактного взаимодействия особенно крупных частиц с поверхностью детали, приводящих к дроблению зерен и появлению выколов, рисок. Такие частицы будут утапливаться в полировальник и количество частиц, контактирующих с деталью увеличится за счет зерен более мелких фракций. Существенно меньшую роль в дроблении абразивных частиц будут играть и ускорения относительного движения детали по полировальнику. С другой стороны, изменение режимов полирования может изменить степень влияния на процесс химико-физических явлений, что, безусловно отразится на количественных и качественных показателях процесса.

Однако общность многих явлений, происходящих при доводке и полировании, позволила автору использовать методику П.Н.Орлова для исследования процессов абразивного и химико-механического полирования хрупких монокристаллов кремния, арсенида галлия, сапфира, карбида кремния. В качестве параметра качества

обработанной поверхности использовалась глубина и структура нарушенного поверхностного слоя. Полирование проводилось как алмазными пастами АСМ0,5/0, так и щелочными суспензиями на основе ZrO_2 ; SiO_2 ; Al_2O_3 .
Обнаружено, что при полировании кремния алмазной пастой повышение скорости V от 9 до 89 м/мин вызывает уменьшение силы сопротивления F_0 , примерно в 1,2 раза, удельного съема K (величины съема на единицу длины пути движения подложки по полировальнику) в 1,6 раза и глубины разрушенного слоя в 2 раза. Повышение давления от $p=0,01$ МПа до $P=0,02$ МПа также приводит к снижению глубины нарушенного слоя примерно, на 20 %. Это объясняется повышением температуры при более высоком давлении и облегчением протекания пластических деформаций в приповерхностном слое кремния при повышении скорости его деформирования.

Подтверждением этого является повышенное содержание аморфной фазы в структуре поверхностного слоя, обнаруженное электронно-графическими исследованиями [2]. При химико-механическом полировании щелочной суспензией на основе ZrO_2 изменения глубины нарушенного слоя в зависимости от скорости V не обнаружен. Однако его структура зависит от условий полирования. В частности, с увеличением V возрастает плотность дефектов в поверхностном слое. Это вызвано, по-видимому, увеличением роли абразивного изнашивания поверхности при химико-механическом полировании. Общая глубина нарушенного слоя кремния после полирования суспензией ZrO_2 не превышала 1,5 мкм, а после пасты АСМ-0,5 - 2-4 мкм.

Более точно оценить качество полирования удалось при исследовании электрических характеристик диодов, выполненных в поверхностном слое отполированных подложек, т.к. структурные дефекты монокристалла полупроводника существенно изменяют характер протекания электронных процессов [21]. Например, уравнения регрессии, связывающие пробивное напряжение таких диодов с режимами полирования имеет вид:

$$U_{пр} = 133,71 + 9,67p + 582v + 2,06p \cdot v, \quad (12)$$

$$U_{пр} = 144,23 + 0,35p + 12,7v + 2,06p \cdot v, \quad (13)$$

где (12) - для полирования суспензией;

(13) - для полирования пастой АСМ 05/0.

Исследования, проведенные на стенде для моделирования процессов доводки и полирования в МВТУ им.Н.Э.Баумана, позволили обнаружить влияние на качество и производительность, в частности, полирования, ускорений относительного движения деталей по полировальнику. Так, при полировании кремния алмазной пастой АСМ 05/0 на режимах, при которых детали испытывают тангенциальные ускорения в диапазоне $a_{\tau} = (3,5 \pm 4,75) \text{ м/с}^2$, сила сопротивления движению и удельный съем K были в 1,3-1,6 (F) и 1,25-1,35 (K) раза выше, чем при полировании на режимах с постоянной скоростью.

При механическом полировании абразивными составами наиболее критичным режимным фактором является давление. При его повышении уменьшается подвижность зерен, повышается температура в зоне обработки. Это приводит к возрастанию процессов резания и пластических деформаций в формировании гладкой поверхности. Например, полированная алмазной пастой АСМ 1/05 при давлении 0,2 МПа поверхность кремния характеризуется явно выраженными следами пластического течения материала. Снижение давления увеличивает роль микроударных воздействий на обрабатываемую поверхность. При таких условиях диспергирования может быть получена идеально гладкая поверхность без структурных нарушений в поверхностном слое. Микроударное диспергирование лежит в основе гидроэмиссионного полирования [22], при котором в зоне обработки между деталью и полировальником, отстоящими друг от друга на несколько мкм, создается повышенное гидродинамическое давление в абразивной суспензии.

При химико-механическом полировании изменение режимов обработки приводит к изменению степени влияния химических и механических процессов на диспергирование материала. Увеличение скорости V и давления p увеличивает роль абразивного разрушения, но вызываемое при этом повышение температуры может активизировать и химические процессы модификации поверхностного слоя. Оптимальными режимами химико-механического полирования являются такие, при которых скорости химической модификации поверхностного слоя и его абразивного удаления совпадают. Важнейшим фактором в таких процессах является температура. При повышенной температуре в зоне полирования расширяется круг возможных химических реакций, что позволяет использовать новые способы полирования. Предложен способ полирования сапфира су-

хими порошками сравнительно мягких окислов SiO_2, Fe_2O_3, MgO [23]. Процесс протекает при температуре 300-500°C. Лучшие результаты получены при использовании порошка SiO_2 с размером частиц 100-200 Å. Скорость съема была не ниже 3-4 мкм/ч, нарушенный слой отсутствовал. Методы безабразивного гидратного полирования сапфира при температуре 200-250°C [24] и полирования щелочными коллоидными растворами на основе SiO_2 при температуре до 83°C [25] также позволяют получить бездефектную поверхность при скорости съема до 26 мкм/ч.

4. Полирование деталей лепестковыми кругами

Лепестковые круги являются разновидностью эластичного абразивного инструмента и позволяют полировать поверхности широкого класса деталей до $R_a = 0,63 \pm 0,04$ мкм. Конструктивно они представляют собой ступицу с закрепленными на ней лепестками из абразивной шкурки. Лепестковые круги делят на плоские (ЛКП) с цилиндрической рабочей поверхностью и торцевые (ЛКТ) с кольцеобразной рабочей поверхностью.

По способу крепления лепестков круга можно разделить на группы: [26, 27] :

- 1) армированные разборные с механическим закреплением лепестков в ступице;
- 2) армированные неразборные с клеевым закреплением лепестков друг с другом и с арматурой;

3) армированные с клеевым соединением лепестков с механическим соединением блока лепестков в арматуре; безарматурные со ступицей из синтетической композиции на основе эпоксидной смолы, которой залиты лепестки. Круги выпускаются в широком диапазоне типоразмеров. Например, по ГОСТ 22775-77 ЛКП выпускаются диаметром от 120 до 500 мм и шириной от 25 до 140 мм. На производственном объединении "Брянский автомобильный завод" выпускаются ЛКП диаметром от 30 до 1100 мм и шириной от 8 до 130 мм и ЛКТ диаметром от 125 до 500 мм и шириной рабочего кольца от 18 до 65 мм. Технология изготовления лепестковых кругов достаточно проста и изложена в [26, 27]. Для изготовления лепестков рекомендуется водостойкая шлифовальная шкурка на тканевой основе (ГОСТ 13344-67) из нормального электрокорунда 13А, 14А, 15А или белого электрокорунда 23А, 24А, 25А.

Полирование лепестковыми кругами является отделочной операцией, не позволяющей исправлять погрешности геометрической формы. Для обеспечения требуемой шероховатости необходимо снимать припуск несколько больший, чем высота исходных микронеровностей [28].

$$\Delta = K_R \cdot R_{z_{исх}} \quad (14)$$

где $R_{z_{исх}}$ - исходная высота микронеровностей;

K_R - коэффициент, учитывающий исходную и конечную шероховатость.

Если шероховатость уменьшается в 1-2 раза, $K_R = 1 \pm 1, 1$;

если в 3-4 раза - $K_R = 1, 2 \pm 1, 25$.

На производительность полирования влияют: режимы обработки (частота вращения круга ω и его деформация δ); зернистость шкурки; диаметр круга; отношение длины лепестка L к диаметру ступицы d ; расположение детали относительно оси вращения круга при полировании ЛКТ; степень износа круга.

Шероховатость и состояние поверхностного слоя во многом определяются тепловыми явлениями в зоне обработки, которые зависят от режимов полирования; зернистости шкурки; конструкции круга (ЛКТ или ЛКП с пропиткой или без нее); материала деталей. Механизмы влияния перечисленных факторов на производительность и качество прежде всего связаны с температурой в зоне обработки.

Увеличение угловой скорости ω и степени деформации круга δ до их критических значений приводит к увеличению производительности. Критические значения ω и δ обуславливают на чало интенсивного разрушения шкурки за счет вырывания абразива и размягчения клеевого состава, что особенно опасно для ЛКТ из за худших условий теплоотвода. Повысить стойкость круга можно применением СОЖ. При выборе режимов полирования вначале определяют оптимальную ω (окружную скорость v), а затем δ .

Высокие температуры в зоне полирования, которые достигают 800°C влияют не только на стойкость кругов, но и определяют механизмы выглаживания поверхности и формирования поверхностного дефектного слоя. С ростом v и δ температура в зоне обработки увеличивается. Например, изменение v от 20 до 40 м/с при полировании деталей из закаленной стали ЛКТ диаметром 300 мм, зернистостью 14А4 при $\delta = 0,8$ мм температура поверхностного

слоя увеличилась от 240 до 410°C [26]. Снизить температуру в зоне обработки можно увеличением продольной подачи круга S , но шероховатость поверхности при этом возрастает.

Накопление тепла в поверхностном слое может привести к отпуску материала и его структурным преобразованием, в то время как в условиях отсутствия значительного нагрева превалирует силовой фактор взаимодействия абразивных зерен с материалом детали, приводящий к появлению наклепа поверхностного слоя. Так, при полировании деталей из закаленной стали ЛКТ диаметром 300 мм с зернистостью 14A8

при $v = 40$ м/с; $\delta = 0,8$ мм; $S = 0,05$ м/с наблюдается отпуск поверхностного слоя, глубиной до 18 мкм с характерными растягивающими напряжениями, а при увеличении S до 0,083 м/с и обработке пропитанным кругом в поверхностном слое появились сжимающие напряжения до $5 \cdot 10^8$ Па характерные для наклепа [26]. Для увеличения микротвердости по поверхностного слоя на 25-30 % у деталей из незакаленной стали 45 рекомендуется применять S до 0,1 м/с и уменьшить δ до 0,5 мм. При полировании ЛКП уровень температур в поверхностном слое значительно ниже и не превышает 180°C, что создает условия для его упрочнения за счет силового взаимодействия абразивных зерен с материалом. Максимальное упрочнение может быть получено при оптимальном δ . Например, для стали 45 после полирования ЛКП максимальные сжимающие напряжения $8,5 \cdot 10^8$ Па получены при $\delta = 1,2$ мм.

Сглаживание микронеровностей при полировании ЛКП и ЛКТ, в основном, происходит за счет пластического течения материала. При полировании ЛКП изменение скорости v по-разному влияют на шероховатость деталей из различных материалов. Для деталей из стали 45 и чугуна с увеличением U от 18 до 32,6 м/с R_a уменьшается (например, от 1,12 до 0,61 мкм для нормализованной стали 45), а для мягких сплавов АЛ4 и Л62 наоборот, возрастает на 18-52 %. Увеличение δ приводит к возрастанию шероховатости для всех материалов. Однако с увеличением твердости материала шероховатость уменьшается из-за уменьшения глубины внедрения зерен в поверхностный слой. При полировании ЛКТ увеличение скорости и степени деформации δ , в общем, приводят к уменьшению шероховатости. Эта закономерность справедлива в диапазоне режимов не приводящих к чрезмерному перегреву поверхностно-

го слоя, при котором шероховатость возрастает из-за более глубокого внедрения абразивных зерен в размягченный поверхностный слой и разрушения абразивного круга. К таким же результатам может привести низкая V .

Зернистость круга влияет на механизм удаления припуска и условия взаимодействия абразивных зерен с поверхностью. С точки зрения производительности с увеличением припуска рекомендуется повышать зернистость круга. Шероховатость обработанной поверхности возрастает с увеличением зернистости круга. Так, после полирования стали 45 ЛКП зернистостью 14A4 $\bar{R}_a = 0,16 - 0,32$, а после ЛКП с зернистостью 14A12 $\bar{R}_a = 0,63 \pm 1,25$. При полировании ЛКТ той же зернистости высота микронеровностей, как правило, ниже. При увеличении диаметра ЛКП производительность полирования повышается. Это достигается увеличением окружной скорости рабочих элементов, в результате которого возрастает число лепестков, вводимых в зону обработки в единицу времени. При полировании ЛКТ увеличение диаметра круга позволяет повысить ширину рабочего пояса, что так же приводит к повышению производительности. Однако увеличение диаметров ЛКП и ЛКТ требует более мощного и дорогостоящего оборудования.

Отношение длины лепестка к диаметру ступицы (L/d) характеризует жесткость ЛКП. Уменьшение L/d несколько повышает производительность за счет большего числа лепестков, вводимых в зону обработки в единицу времени, но при этом для достижения оптимального давления приходится снижать деформацию круга, что отрицательно сказывается на производительности. Рекомендации по выбору оптимальной длины лепестков для ЛКП приведены в таблице 8 [26].

При полировании ЛКТ важное значение имеет расположение детали относительно оси инструмента. Так, смещение оси вращения цилиндрических деталей относительно оси вращения круга обуславливает сложную траекторию движения зерен по поверхности детали, при котором облегчаются условия диспергирования материала - повышается производительность до 40 % к снижается шероховатость поверхности (например, \bar{R}_a уменьшается от 0,5 до 0,1 мкм). Смещением осей детали и круга можно регулировать направленность рисок на обрабатываемой поверхности, обеспечивая ее оптимальные эксплуатационные характеристики.

Таблица 8

Диаметр круга, мм	Длина лепестка, мм		Диаметр круга, мм	Длина лепестка, мм	
	Сталь, чугун	Цветные метал- лы и сплавы		Сталь, чугун	Цветные мета- ллы и сплавы
60	10	10	600	75	75
80	20	15	750	90	90
100	25	18	900	100	100
150	40	25	1100	110	110
300	60	50			

Условия обработки существенно ухудшаются при износе круга, который обусловлен тепловыми и силовыми факторами полирования, Интенсивный нагрев круга приводит к размягчению клеевого состава, вызывающему осыпание абразивных зерен. Стойкость круга может быть повышена путем пропитки лепестков составом, содержащим (%): парафин - 40, пластичная смазка ПВК - 55, графит - 5. При этом температура в зоне обработки снижается на 20-25 %. Применение СОЖ для повышения стойкости круга менее эффективно, так как она интенсивно сбрасывается центробежными силами. Однако наличие СОЖ предотвращает общий перегрев детали, который может вызвать ее коробление, уменьшает опасность термического отпуска материала поверхностного слоя. Заметного влияния на шероховатость пропитка круга и применение СОЖ не оказывает. Повысить стойкость круга и снизить уровень шероховатости обработанных поверхностей можно уменьшением силового фактора процесса - снижением v и δ , применением ЛКП с наклонными лепестками, использованием переменных режимов обработки, при которых начальное взаимодействие лепестков с крупными острыми микронеровностями происходит при пониженных давлениях и лишь после существенного сглаживания микровыступов давление (деформацию круга) доводят до рабочего уровня.

Несмотря на то, что в механизме полирования ЛКТ и ЛКП нет предпосылок для исправления исходной формы деталей, этим методом можно получить высокоточные параметры обработанных поверхностей при условии ужесточения допусков на предыдущих операциях.

Оптимальные условия полирования ЛКП и ЛКТ различных поверхностей приведены в таблицах 9, 10, 11 [26].

Таблица 9

Оптимальные условия плоского полирования ЛКП

Материал детали	R_{α} зад., мкм	Круг	Зернистость	V , м/с	δ , мм
Сталь 45 закаленная и нормализованная	0,08-0,16 0,16-0,32	ПП 300 $L=60$ мм	I4A4 I4A4	33	0,8 I
Чугун С4 2I-40	0,32-0,63 0,63-1,25	ПП 300 $L=60$ мм	I4A8 I4AI2		I,2 I,2
Латунь Л62	0,16-0,32 ^{жк} 0,32-0,63 0,63-1,25	ПП 300 $L=50$ мм	I4A4 I4A4 I4A8	30	0,5 0,6 0,8

* Круги пропитаны

Таблица 10

Оптимальные условия круглого полирования ЛКП

Материал детали	R_{α} зад., мкм	Круг	Зернистость лепестков	V , м/с	δ , мм
Сталь 45 закаленная и нормализованная	0,16-0,32 ^{жк} 0,32-0,63 0,63-1,25	ПП 300 $L=60$ мм	I4A4 I4A8 I4AI2	30	I,0 I,2 I,3
Чугун С4 2I-40	0,08-0,16 ^{жк} 0,16-0,32 0,32-0,63 0,63-1,25	ПП 600 $L=75$ мм	I4A4 I4A4 I4A8 I4AI2	35	I,2 I,2 I,5 I,5
Латунь Л62	0,08-0,16 ^{жк} 0,16-0,32 0,32-0,63	ПП 900 $L=100$ мм	I4A4 I4A8 I4AI2	40-45	I,5 2 2
Латунь Л62	0,16-0,32 ^{жк} 0,32-0,63 0,63-1,25	ПП 600 $L=75$ мм	I4A4 I4A4 I4A8	30	0,8 I,0 I,2
АЛ4	0,32-0,63 ^{жк} 0,63-1,25	ПП 600 $L=75$ мм	I4A4 I4A4	30	0,6 0,8

* Круги пропитаны

*^{жк} Лепестки в круге пропитаны и наклонены под углом $\alpha=45^\circ$

Таблица 11

Оптимальные условия плоского полирования ЛКТ

Материал детали	R_a зад., мкм	Зернистость лепестков	v , м/с	S , м/мин	$\bar{\sigma}$, мм кругов с диаметром, мм		
					150	300	500
Сталь 45 нормализованная или закаленная; Чугун С4 21-40	0,04-0,08 ^x	I4A4	40	4-5	0,4	0,8	1,7
	0,08-0,16	I4A4			0,5	0,8	2
	0,16-0,32	I4A8			0,5	0,9	2,5
Латунь Л62	0,08-0,16 ^x	I4A4	35	5	0,3	0,6	1,3
	0,16-0,32	I4A4			0,4	0,7	1,5
	0,32-0,63	I4A8			0,4	0,8	1,8
АЛ 4	0,16-0,32 ^x	I4A4	35	5	0,3	0,6	1,2
	0,32-0,63	I4A4			0,4	0,7	1,5

* Круги пропитаны.

Л и т е р а т у р а

1. Ящерицин П.И., Зайцев А.Г., Барбатько А.И. "Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов". Минск "Наука и техника". 1976 г.
2. Орлов П.Н., Скворцов К.Ф., Ушаков А.С. "Влияние процесса алмазной полировки на качество эпитаксиального слоя кремния" "Алмазы" М.НИИМАШ (реф.сб.) - 1972. №6. С.15-22.
3. Maybun S.J. Electrochem Soc., 1969.116, №4, p.503-510.
4. Samuels L. and Brown R. - Mechanism of Abrasive Polishing - „Annals of the CIRP”.
5. Bouden F.P. and Hughes T.P. Proc. Royal Socirty, 1937 160 Ap.575.
6. French J. - Trans. Opt. Soc. 1947. V 18, p 8.
7. Booker G.R. Stider R - J.Electrec Soc, 1962.№8, p.109.

8. Ящерицин В.И. - Повышение эксплуатационных шлифованных поверхностей. Минск. "Наука и техника". 1966 г.

9. Sun N.P. The delamination theory of wear, 1973, 25, №1, p. 111-124.

10. Карбань В.И. и др., "Механизмы процесса полирования кремния алмазными пастами" "Синтетические алмазы" 1976, №3, с. 65-69.

11. Обработка полупроводниковых материалов. Ред. Н.В.Новиков, В.Бертолзи. Киев. "Наукова думка" 1983 г., с.168

12. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет трения и износа. Ред. А.Ю.Ишлинский. М. "Наука". 1971 г., с.15-22.

13. Каданар Л. И. "Справочник по гальванотехнике" Киев "Техника", 1976. с.254.

14. Дмитриева Г.А., Марин К.Г. и др. - "Перспективные направления химической обработки полупроводниковых. "Электронная промышленность", 1980 г. №10 с.57-58.

15. Ребиндер П.А. - Адсорбционные слои и их влияние на свойства дисперсионных систем. Изв. АН СССР. "Химия". 1936. Т. 5, №3, стр. 39-64.

16. Винокуров В.М. - Исследование процесса полировки стекла. М. "Машиностроение". 1967 г. 196 стр.

17. *Singer F. Frans Brit. Ceram. Soc. 1939, V.38, p. 513.*
18. *Murze G, Einflussgrößen des Läppgerätes beim Flachläppen. „Fertigungstechnik und Betrieb“, 1965, Bd. 15, №1, 35-38.*

19. Орлов П.Н., Савелова А.А., Полухин В.А., Нестеров Ю.И., "Доводка прецизионных деталей машин". Ред. Г.М.Ипполитов. М. "Машиностроение". 1978, 256 с.

20. Пеккер И.С., Павлова В.В. Полирование твердых сплавов. В сб. "Алмазы и сверхтвердые материалы". вып.4, М. НИИМАШ, 1974.

21. Скворцов К.Ф. Особенности полирования кремниевых подложек для производства полупроводниковых приборов различного типа, В сб. "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин", М. МВТУ, 1973. стр.108- 113.

22. Жалнин В.П., Нестеров Ю.И., Скворцов К.Ф. "Инструмент для гидродинамической обработки плоских деталей. Авторское свидетельство №1206067. Бюллетень "Открытия, изобретения,

промышленные образцы и товарные знаки" 1985 г.

23. Нестеров Ю.И., Скворцов К.Ф., Холевин В.В. - Прогрессивные методы финишной обработки монокристаллических подложек ИС. "Технологические проблемы производства электронно-вычислительной аппаратуры". М. МВТУ, 1980 г. №331, с.20-39.

24. *Memoy Da, Bramy I. - Abrasion polishing of sapphires, a novel finishing technique using hydration phenomenon. Bul., - "Jap. Soc. Precis. Eng.", 1967, №4, p. 156-158.*

25. *Gutche H.W., Mody J.W. - Polishing of sapphire with colloidal silica - "Jap. Electrochem. Soc.", 1978, 125, №1, p. 136-138.*

26. Гдалевич А.И. и др. "Полирование деталей лепестковыми кругами". М. "Машиностроение" 1980.

27. Щеголев В.А., Уланова Н.Е. "Эластичные абразивные и алмазные инструменты". Л. "Машиностроение", 1977 г.

28. Наерман М.С., Панова С.А. "Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками". М. "Машиностроение", 1971 г. с.100.

Ю.И.Нестеров

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ В УСЛОВИЯХ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ЗАДАННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ

Анализ динамических характеристик процесса абразивного изнашивания для различных сочетаний элементов системы: притир-абразивная прослойка-заготовка, полученных нами [1] в исследуемом диапазоне скоростей изнашивания 6-84 м/мин и уровня рабочего давления 0,04-0,18 МПа показал, что удельная динамическая жесткость взаимодействия заготовки через абразивную прослойку с притиром K_g^* лежит в пределах:

$$0,1 \leq K_g^* \leq 10, \quad \frac{H}{\text{мм}} \cdot \frac{2}{\text{мм}}$$

а удельная статическая жесткость этой системы лежит в пределах:

$$0,1 \leq K^* \leq 1,0, \quad \frac{H}{\text{МКМ} \cdot \text{мм}^2}$$

На границе устойчивости демпфирующая способность доводочного станка может быть оценена по критерию Мерита следующим образом:

$$R_e = \frac{K_c}{S K^*}$$

Для нормальной упругой системы доводочного станка $R_e \approx 4$, если принять $K_{ср}^* \approx 0,45 \text{ Н/МКМ} \cdot \text{мм}^2$, а S - площадь обрабатываемых заготовок равной 1 мм^2 , то необходимая статическая жесткость станка (на границе устойчивости) $K_c \approx 1,8 \text{ Н/МКМ}$ на каждый мм^2 площади обрабатываемых заготовок.

Полученная оценка устойчивости процесса механической абразивной доводки показывает, что значительный ее объем происходит при нестабильных условиях.

Чем выше статическая жесткость зоны взаимодействия заготовки через абразивную прослойку с инструментом, тем сложнее обеспечить устойчивость этого вида механической прецизионной обработки,

Стремление к увеличению статической жесткости доводочных станков не оправдывает себя, т.к. необходимая статическая жесткость станка определена величиной $1,8 \text{ Н/} \cdot \text{мм}^2$, а в реальных производственных условиях суммарная площадь обрабатываемых заготовок достигает несколько десятков тысяч мм^2 .

Наиболее перспективным направлением обеспечения устойчивости процесса механической абразивной доводки в условиях регенеративного возбуждения является повышение демпфирующей способности станка в некотором частотном диапазоне, определяемом на основе анализа динамических характеристик процесса абразивного изнашивания и упругой системы конструкции доводочного станка.

Необходимым условием потери устойчивости замкнутой динамической системы: процесс абразивного изнашивания - станок, является пересечение (или касание) двух петель комплексных частотных характеристик динамики процесса абразивного изнашивания и динамики упругой системы станка.

При уменьшении величины (U_R) максимальной отрицательной величины действительной части первой резонансной петли комплексной частотной характеристики упругой системы доводочного

станка процесс механической абразивной доводки становится более устойчивым.

Это может быть достигнуто включением в структуру упругой системы станка устройства, назовем его стабилизатором, который позволит сместить первую резонансную петлю комплексной частотной характеристики податливости полученной композиционной упругости системы станка вправо, в положительном направлении действительной оси комплексной плоскости. Если при этом стабилизатор не получает дополнительную энергию, то его будем называть пассивным.

Основными характеристиками или параметрами пассивного стабилизатора являются K_2 - коэффициент жесткости и C_2 - коэффициент демпфирования.

Поскольку параметры K_2 и C_2 стабилизатора не зависят от параметров упругой системы станка, то соответствующим их подбором мы можем добиться выполнения указанного выше условия.

Нами выполнены экспериментальные исследования устойчивости процесса механической абразивной доводки на станке, в конструкцию которого были встроены разработанные в МВТУ им.Н.Э.Баумана пассивные стабилизаторы с кольцевым гистерезисным демпфером и масляным демпфером, техническая новизна которых защищена авторским свидетельством СССР [2].

Пассивный стабилизатор с кольцевым гистерезисным демпфером

Конструкция стабилизатора представлена на рис.1. В данной конструкции параметр K_2 определяется диаметром d пружины 4. Измеренные величины параметра K_2 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип пружины	А	В	С
d, мм	II	13	14
K_2 , Н/мм	3660	2910	1960

Демпфер стабилизатора является гистерезисным кольцевого типа. Его демпфирующие свойства зависят от величины предварительного натяга, который создается за счет ввинчивания опорного цилиндра 1 в блок-основание 2 стабилизатора по резьбе,

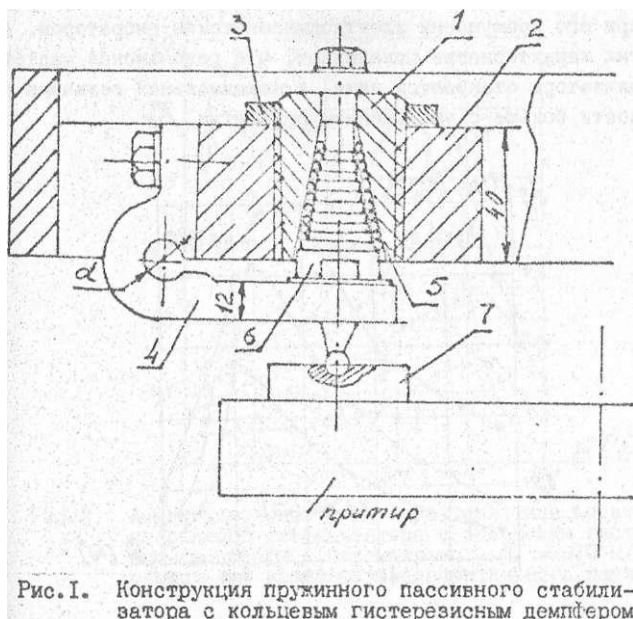


Рис. I. Конструкция пружинного пассивного стабилизатора с кольцевым гистерезисным демпфером

имеющей шаг 3 мм и нарезанной на внешней цилиндрической поверхности опорного цилиндра 1.

Опорный цилиндр 1 стопорится в блоке 2 с помощью стопорной гайки 3. Цилиндр имеет внутреннюю опорную коническую поверхность для медных кольцевых демпферов.

Десять кольцевых демпферов 5 надеты на ступенчатую шпильку 6, одна сторона которой закреплена в заднем торце опорного цилиндра 1, а другая опирается на пружину 4 и обрабатываемый образец 7.

Возможны пять условий предварительного натяга I, II, III, IV, V в силовой цепи стабилизатора, причем максимальный натяг соответствует условию I, а условия II, III, IV, V соответствуют уменьшению натяга на четверть шага резьбы опорного цилиндра I.

На рис.2 представлены экспериментально полученные амплитудно-частотные характеристики стабилизатора для различных параметров K_2 (типов пружин) и фиксированного предваритель-

ного натяга III. Указанные характеристики стабилизатора получены при его возмущении электродинамическим вибратором. Анализ этих характеристик показывает, что резонансная частота стабилизатора становится ниже, а максимальная величина податливости больше с уменьшением параметра K_2 .

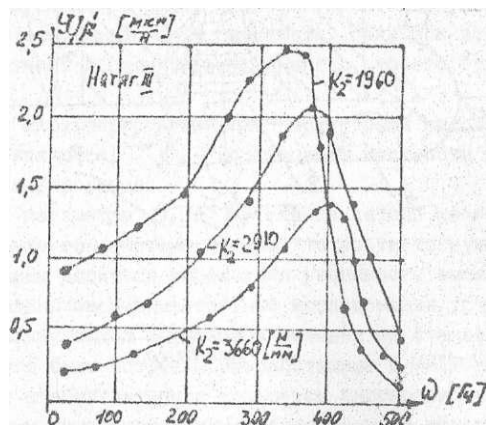


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика податливости пассивного стабилизатора с кольцевым гистерезисным демпфером

На рис.3 представлены экспериментально полученные амплитудно-частотные характеристики стабилизатора для различных условий предварительного натяга при фиксированном параметре $K_2=2910$ Н/мм.

Анализ этих зависимостей показал, что хотя предварительный натяг способствует некоторому увеличению жесткости стабилизатора, о чем свидетельствует заострение резонансных пиков, однако, увеличение натяга создает и большее демпфирование.

Экспериментальное оборудование и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования выполнены на станке-стенде. Схема и конструкция исполнительного механизма станка-стенда представлена на рис.4.

Была осуществлена доводка плоских образцов из стали У8А

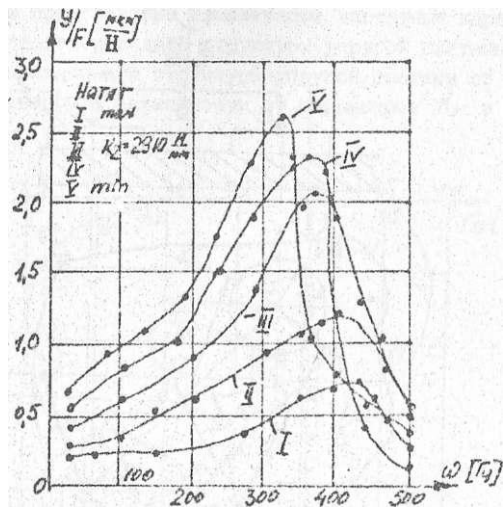


Рис.3. Амплитудно-частотная характеристика податливости пассивного стабилизатора с кольцевым гистерезисным демпфером с параметрами: $K_2=2910$ н/мм и различными уровнями предварительного натяга

($HV = 2850$ Н/мм²). Обработка производилась на чугунном притире ($HB = 1200$ Н/мм²), абразивной суспензией: абразив карбид бора, зернистость 40 мкм, основной наполнитель суспензии 90 % глицерин, 10 % вода, весовое содержание твердой и жидкой составляющих суспензии, определяются как Т:Ж=1:3. Абразивная суспензия подавалась на рабочую поверхность инструмента методом полива в количестве 120 капель в минуту. Указанный абразив выбран как один из наиболее распространенных материалов в практике работы доводочных цехов.

Экспериментальные исследования выполнены для четырех уровней рабочего давления $P = 0,04; 0,08; 0,12; 0,16$ МПа и пяти уровней средней скорости относительного движения образца по инструменту

$v = 6; 12; 36; 60; 84$ м/мин., что обеспечивалось соответствующим подбором частот вращения шпинделя привода образца n_2 и инструмента n_4 .

Перед обработкой исходная рабочая поверхность инструмента имела отклонения от плоскости в пределах 3-5 мкм, исходная погрешность формы образца была в пределах 1 мкм.

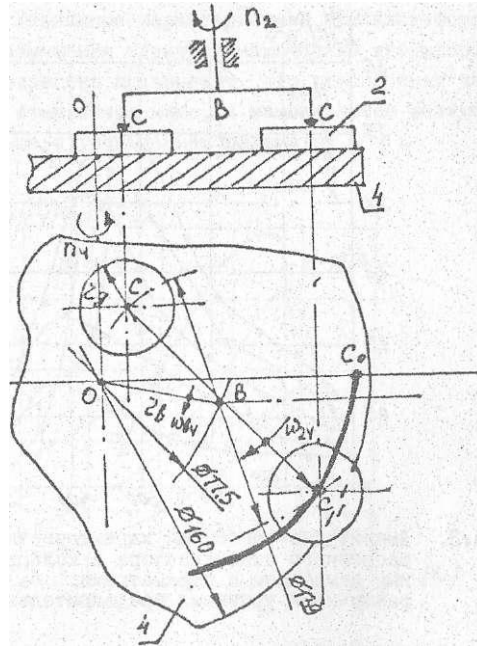


Рис.4. Схема исполнительного механизма станка-стенда

Минутный съем материала образца $h_{ср}$ определялся линейным износом образца в минуту. Линейный износ образца определялся с помощью оптиметра типа "Carl Zeiss" в пяти точках с вычислением средней

$$h_{ср} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5}{5} \quad \text{мм}$$

величины

Отклонения от плоскости образцов оценивались с помощью прибора "Talysurf-4" фирмы "Taylor-Hobson" (точность измерения 0,05 мкм). Каждый из образцов обрабатывался в течении 40 минут. Диаметр образца определялся расчетной величиной критической площади обрабатываемой поверхности $S_{кр}$.

Уровень вибрации измерялся с помощью сейсмического датчика-акселерометра.

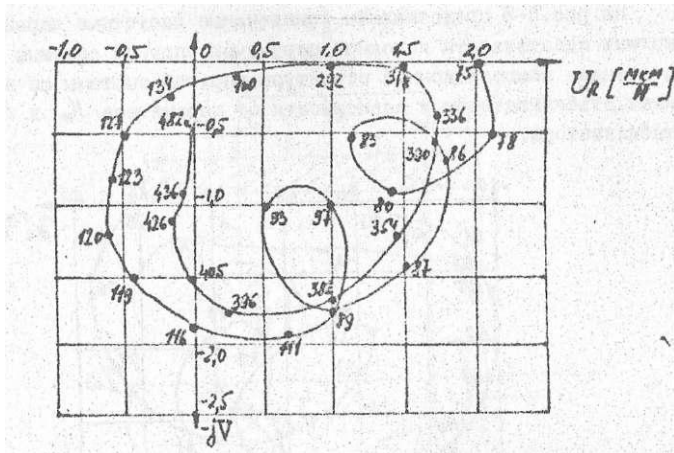


Рис.7. Комплексная частотная характеристика податливости композиционной структуры станка-станда с параметрами стабилизатора $K_2=2910$ Н/мм, уровень предварительного натяга III.

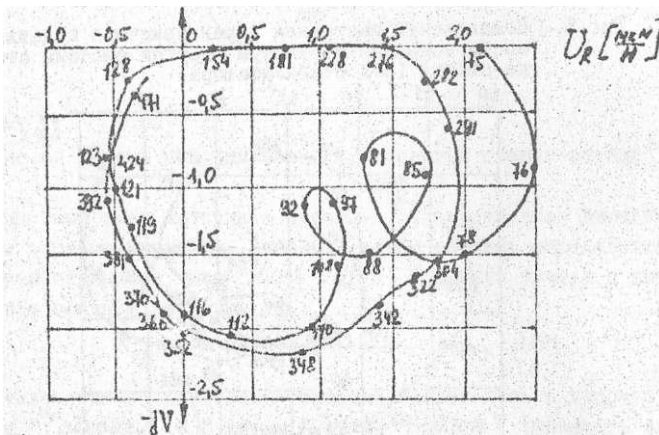


Рис.8. Комплексная частотная характеристика податливости композиционной структуры станка-станда с параметрами стабилизатора $K_2=1960$ н/мм, уровень предварительного натяга III

Анализ этих зависимостей показывает, что с уменьшением параметра максимальная отрицательная величина действительной части петли комплексной частотной характеристики, податливости упругой системы станка, обусловленной резонансом композиционной структуры упругой системы станка уменьшается, в то время как максимальная отрицательная величина действительной части петли комплексной частотной характеристики податливости, обусловленной резонансом самого стабилизатора увеличивается. Аналогичные результаты были получены для композиционной структуры упругой системы станка с параметром

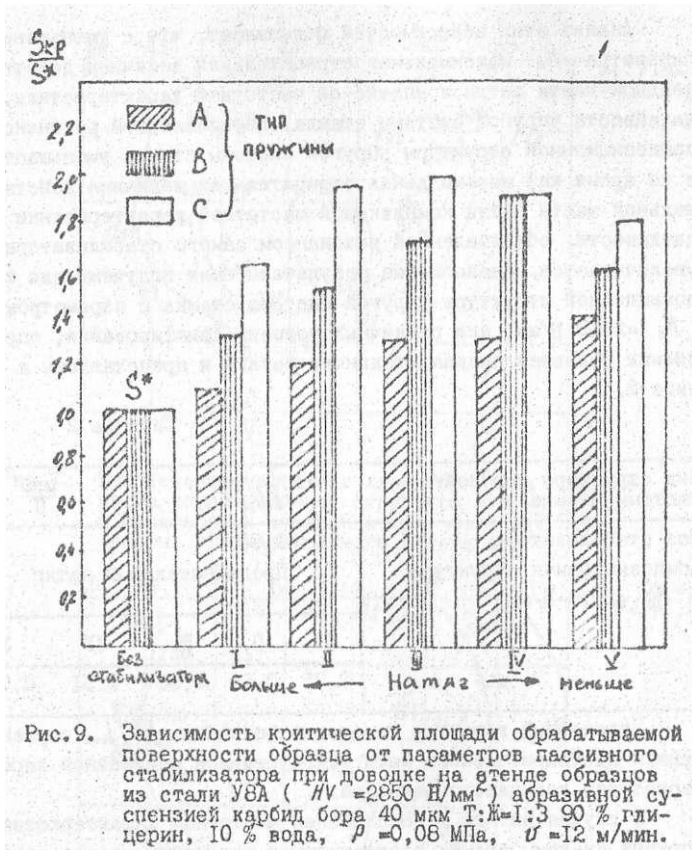
$K_2=2910$ Н/мм, для различных условий демпфирования, определяемых условием предварительного натяга и представлены в таблице 2.

Таблица 2

Вид структуры упругой системы станка	$ U_R^c _{max}$	$\frac{MKM}{H}$
Без стабилизатора	0,98	
Композиционная структура ($K_2=2910$ Н/мм)	Предварительный натяг	
	I II III IV V	
	0,75 0,65 0,58 0,51 0,73	

Нелинейный характер изменения величины $|U_R^c|_{max}$ с уменьшением предварительного натяга, обусловлен нелинейной характеристикой кольцевого демпфера.

В случае натяга V комплексная частотная характеристика упругой системы станка соответствует резонансу самого стабилизатора, этим можно объяснить, почему абсолютная величина максимальной отрицательной действительной части комплексной частотной характеристики податливости композиционной структуры для условия предварительного натяга V больше, чем для большего предварительного натяга, определяемого условием IV. Анализ результатов экспериментальных исследований На рис.9 представлена зависимость критической площади $S_{кр}$ обрабатываемой поверхности образца от параметров пассивного стабилизатора K_2 и величины предварительного натяга



для одного из режимов обработки.

Анализ этой зависимости показывает, что наибольшая величина $S_{кр}$ для одной и той же величины предварительного натяга соответствует наименьшей величине параметра K_2 .

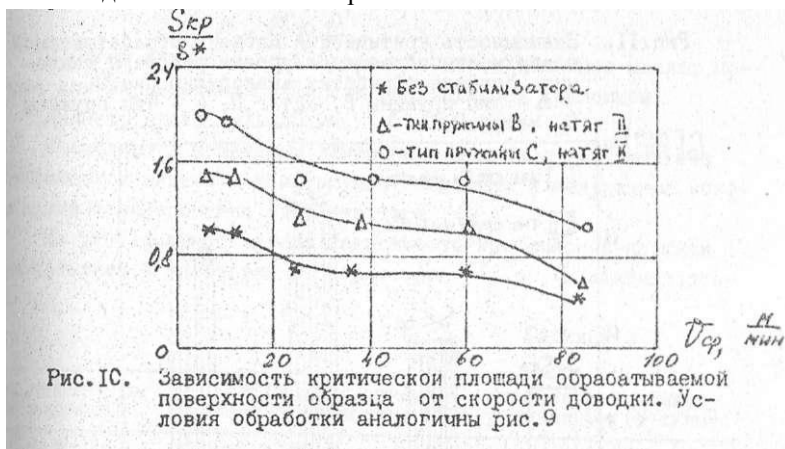
Большему предварительному натягу соответствует большее демпфирующее действие стабилизатора.

Наилучшее сочетание параметров $K_2=1960 \text{ Н/мм}$ и предварительный натяг III определяло наибольшую величину $S_{кр}$, это хорошо согласуется с расчетной зависимостью представленной

на рис.8, что позволяет заключить, что методика синтеза композиционной структуры упругой системы станка с пассивным стабилизатором получила экспериментальное подтверждение.

На рис.10 представлена зависимость критической площади обрабатываемой заготовки от скорости доводки.

При низких скоростях доводки $V = 6-12$ м/мин стабилизирующее действие композиционной структуры упругой системы станка с пассивным стабилизатором выше, чем в диапазоне 36-84 м/мин, это может быть объяснено уменьшением величины динамической жесткости контактного взаимодействия образец-абразивная прослойка- инструмент в указанном диапазоне низких скоростей.



На рис.11 представлена зависимость критической площади образца $S_{кр}$ от уровня рабочего давления.

В диапазоне рабочих давлений от 0,04 до 0,08 МПа увеличение рабочего давления усиливает стабилизирующее действие композиционной структуры упругой системы станка с пассивным стабилизатором, т.к. в этом диапазоне рабочих давлений имеет место уменьшение динамической жесткости контактного взаимодействия образец-абразивная прослойка-инструмент K_g^* и незначительная величина уровня рабочего давления не уменьшает предварительный натяг. Дальнейший рост уровня рабочего давления ведет к уменьшению величины предварительного натяга и как следствие, к уменьшению демпфирующей способности стабилизатора при заданных параметрах K_2 и C_2 .

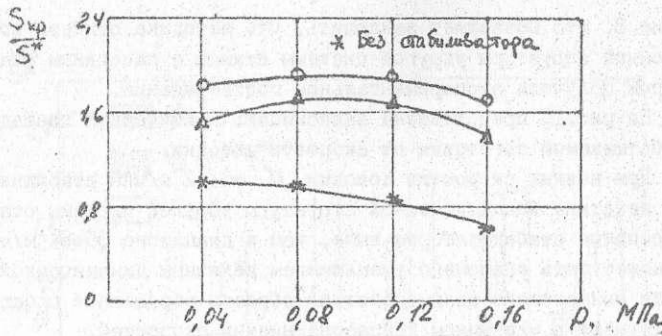


Рис. 11. Зависимость критической площади обрабатываемой поверхности образца от уровня рабочего давления. Условия обработки аналогичны рис. 9
 Δ - тип пружины В, натяг П, О - тип пружины С, натяг П.
 * - без стабилизатора

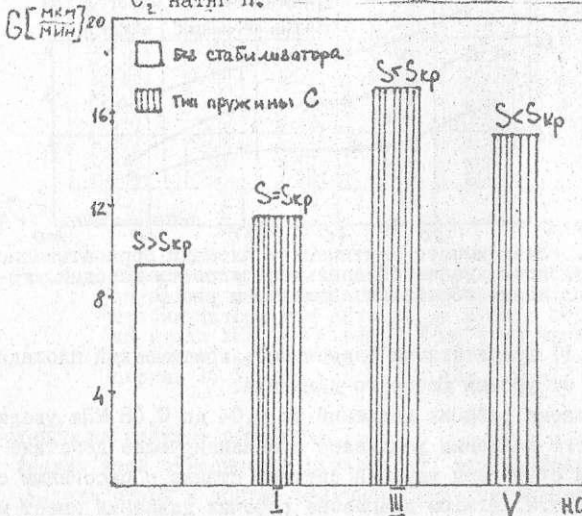


Рис. 12. Зависимость минутного съема G от параметров стабилизатора. Площадь образца $S = S_{кр}$ при $A_2 = 1960$ Н/мм, натяг I. Условия обработки аналогичны рис. 9

На рис.12 представлена зависимость минутного съема от параметров стабилизатора.

Анализ этой зависимости показывает, что более устойчиво-

му процессу механической абразивной доводки соответствует более высокая производительность.

Пассивный стабилизатор с масляным демпфером

На рис.13 представлена конструкция пассивного стабилизатора с масляным демпфером.

Отличительной особенностью предлагаемой конструкции является то, что подвижный конец пружины 4 оперт на шток 2, связанный с диском 3 масляного демпфера. Коэффициент демпфирования стабилизатора определяет величина зазора l , диаметр диска D , вязкость масла θ

$$C_2 = \frac{3\pi}{32} \theta \frac{D^4}{l^3}$$

В нашем случае использовалось обычное машинное масло, которое для варьирования вязкости разбавлялось керосином.

Диаметр диска $D=50$ мм, $l=1$ мм.

В таблице 3 приведены измеренные величины коэффициента динамической вязкости демпфирующей жидкости и полученные коэффициенты демпфирования стабилизатора C_2 .

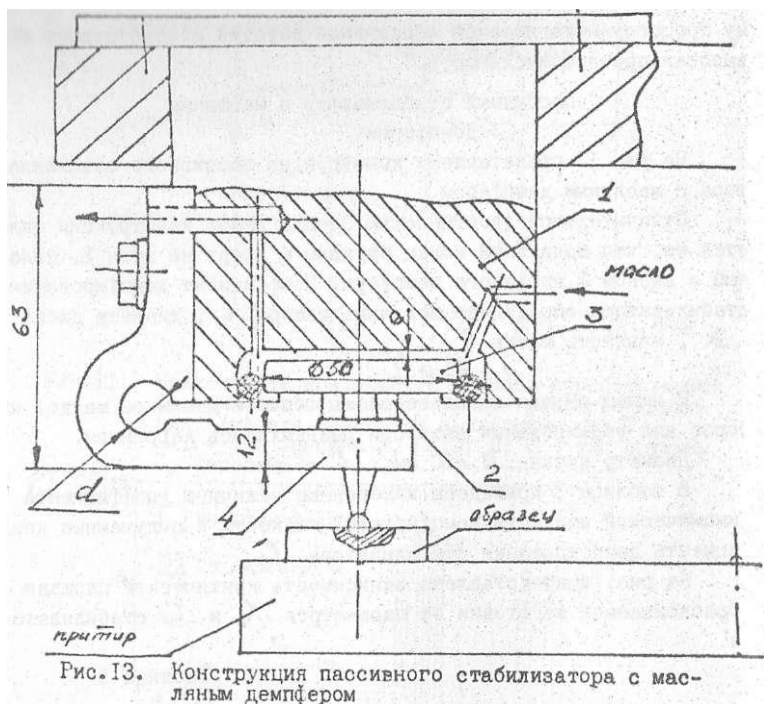
На рис.14 представлена зависимость критической площади обрабатываемой заготовки от параметров K_2 и C_2 стабилизатора.

Таблица 3

Тип демпфирующей жидкости	Коэффициент динамической вязкости, СП	Коэффициент демпфирования C_2 (Н*с/мм)
I	13,1	0,025
II	35,2	0,066
III	125,6	0,236
IV	387	0,727

Анализ этой зависимости показывает, что при одном и том же коэффициенте демпфирования C_2 стабилизатор с меньшим параметром K_2 оказывает на процесс обработки более сильное стабилизирующее воздействие, процесс становится более устойчивым, так как ему соответствует наибольшая величина $S_{кр}$.

В целом зависимость $S_{кр}$ от параметра C_2 носит нелинейный характер как и в первом случае и хорошо согласуется с теоретической зависимостью представленной на рис. 14, и позволя-

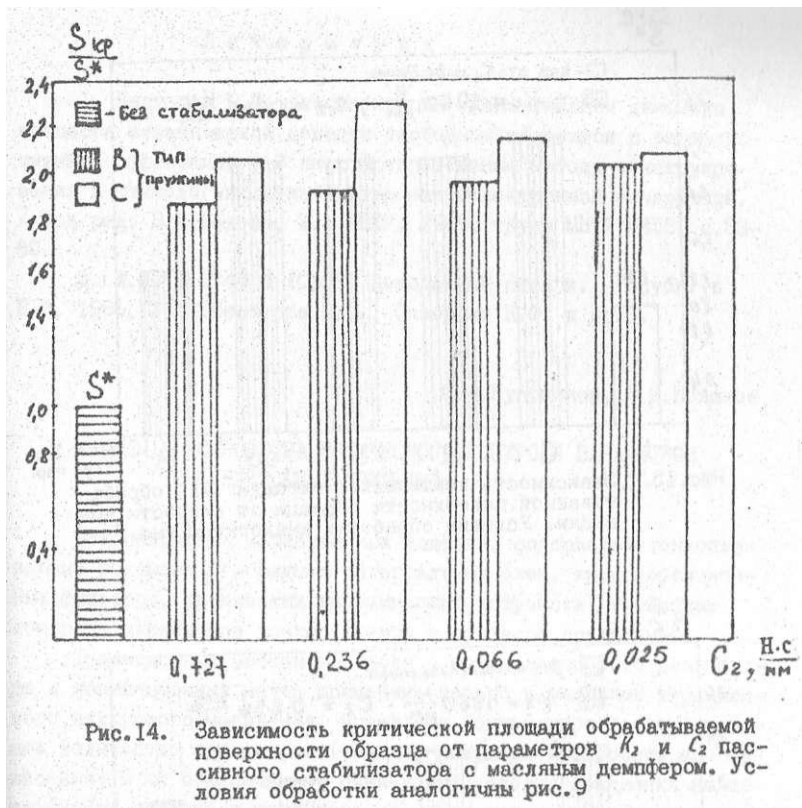


ет сделать заключение, что методика синтеза композиционной структуры упругой системы доводочного станка с пассивным стабилизатором получила экспериментальное подтверждение.

На рис. 15 представлена зависимость критической площади $S_{\text{кр}}$ обрабатываемой заготовки от скорости доводки для $K_2=1960 \text{ Н/мм}$ и $C_2=0,236 \text{ Н*с/мм}$. Сравнение указанной зависимости с аналогичной для стабилизатора с кольцевым гистерезисным демпфером, представленной на рис. 10, показывает, что стабилизатор с масляным демпфером, оказывает на процесс доводки более сильное стабилизирующее воздействие.

Это подтверждает и зависимость критической площади обрабатываемой заготовки $S_{\text{кр}}$ от уровня рабочего давления, представленная на рис. 16.

Выполненные исследования показали, что в условиях регенеративного возбуждения наиболее перспективным направлением обе-



спечения устойчивости процесса механической абразивной доводки является повышение демпфирующей способности станка в частотном диапазоне, определяемом на основе анализа динамических характеристик процесса абразивного изнашивания и упругой системы станка с учетом заданных ограничений.

Композиционная структура упругой системы конструкции станка с пассивным стабилизатором позволяет повысить устойчивость и производительность процесса механической абразивной доводки, причем стабилизирующее воздействие стабилизатора с масляным демпфером значительно выше по сравнению с кольцевым гистерезисным демпфером.

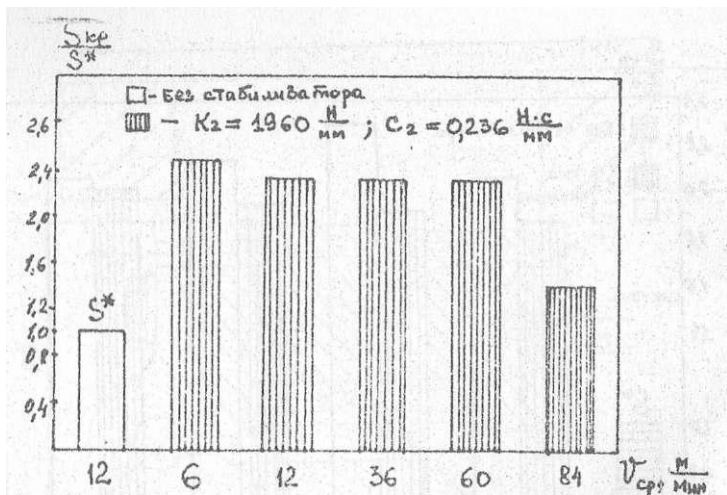


Рис. 15. Зависимость критической площади S_{cr} обрабатываемой поверхности образца от скорости доводки. Условия обработки аналогичны рис. 9

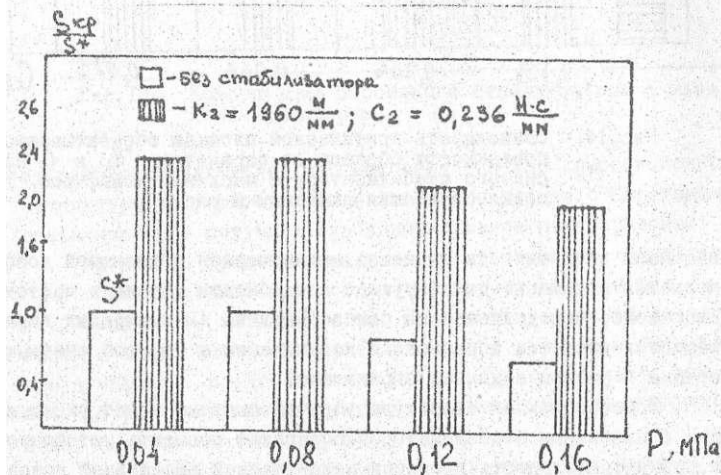


Рис. 16. Зависимость критической площади S_{cr} обрабатываемой поверхности образца от уровня рабочего давления. Условия обработки аналогичны рис. 9

Л и т е р а т у р а

1. Нестеров Ю.И. Автоматизация идентификации динамики процесса механической доводки свободным абразивом с регенеративными эффектами. - В кн.: Прогрессивные методы конструирования и технологии производства микроэлектронной аппаратуры. / Под ред. Б.И.Белова, М.: МВТУ, 1986, труды МВТУ №455, с.53- 60.

2. А.с. №1274914 (СССР) Доводочный станок. - опубл. в Б.И. 1986, №45 (Нестеров Ю.И., Скворцов К.Ф. и др.).

С.О.Куприянов, Ю.Н.Новиков

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Для получения качественных изделий, содержащих тонкопленочные покрытия (гибридных интегральных схем, интерференционных фильтров, оптических запоминающих устройств) необходим контроль параметров тонких пленок в процессе осаждения.

Традиционные методы контроля - метод кварцевого резонатора и ионизационный метод применимы только в условиях термического вакуумного напыления, позволяют контролировать ограниченное количество параметров (толщину покрытия и скорость его нанесения) и не обеспечивают одинаковые условия осаждения на поверхность датчика и подложки.

В отработанных технологических процессах метод кварцевого резонатора может быть использован достаточно успешно. В работе [1] сообщается, что при изготовлении оптических фильтров с чередующимися слоями ZnS и MgF_2 толщиной 200 и 110 нм соответственно, с помощью кварцевого датчика точность контроля толщины составляла 3,5 нм.

При разработке новых изделий и отработке режимов технологических процессов оптические методы контроля обладают рядом преимуществ, связанных как с расширением области применения, так и с увеличением количества контролируемых параметров. Они могут быть использованы в любых, за исключением рассеивающих

свет, средах (вакуум, газ, жидкость, плазма). Для пленок, выполняющих "оптические" функции, обеспечивается контроль параметров, характеризующих пленку именно как оптический элемент, т.е. оптической толщины, комплексного показателя преломления. Сканируя изучение по поверхности пленки, можно получить данные об однородности покрытий по различным параметрам.

Практически для контроля в процессе осаждения используют фотометрический, спектрофотометрический и эллипсометрический методы, каждый из которых обладает как достоинствами, так и недостатками.

1. Взаимодействие оптического излучения с контролируемым объектом

Пусть имеется резкая граница раздела двух однородных изотропных сред с показателями преломления n_k и n_{k+1} (рис. 1). При падении на границу плоскополяризованной световой волны под углом ϵ_k относительно нормали, часть энергии отразится под углом ϵ_k , часть пройдет во вторую среду под углом ϵ_{k+1} .

Для амплитудных коэффициентов отражения и пропускания можно записать [2]:

$$\left. \begin{aligned} (r_p)_{k,k+1} &= \frac{n_k \cos \epsilon_{k+1} - n_{k+1} \cos \epsilon_k}{n_k \cos \epsilon_k + n_{k+1} \cos \epsilon_{k+1}} \\ (r_s)_{k,k+1} &= \frac{n_k \cos \epsilon_k - n_{k+1} \cos \epsilon_{k+1}}{n_k \cos \epsilon_k + n_{k+1} \cos \epsilon_{k+1}} \\ (t_p)_{k,k+1} &= \frac{2 n_k \cos \epsilon_k}{n_k \cos \epsilon_{k+1} + n_{k+1} \cos \epsilon_k} \\ (t_s)_{k,k+1} &= \frac{2 n_k \cos \epsilon_k}{n_k \cos \epsilon_k + n_{k+1} \cos \epsilon_{k+1}} \end{aligned} \right\} (1)$$

где r_p и t_p - коэффициенты отражения и пропускания для электромагнитной волны, поляризованной в плоскости падения;

r_s и t_s - коэффициенты отражения и пропускания для электромагнитной волны, поляризованной в плоскости, перпендикулярной плоскости падения

ϵ_k и ϵ_{k+1} - углы падения и преломления, связанные законом Снеллиуса:

$$n_k \sin \epsilon_k = n_{k+1} \sin \epsilon_{k+1} \quad (2)$$

Если излучение падает по нормали или под углом $\epsilon_k \leq 5^\circ$, то

$$\cos \epsilon_k \approx \cos \epsilon_{k+1} \approx 1$$

В этом случае различия между p - и s - составляющими исчезают и соотношения (1) упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} r_{k,k+1} &= \frac{n_k - n_{k+1}}{n_k + n_{k+1}} \\ t_{k,k+1} &= \frac{2n_k}{n_k + n_{k+1}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При наличии поглощения в средах соответствующие выражения можно получить при замене n_j на $\hat{n}_j = n_j - iK_j$

В процессе осаждения покрытия контролируемая система в общем случае может содержать тонкую пленку толщиной d_2 и показателем преломления $\hat{n}_2 = n_2 - iK_2$ на подложке толщиной d_3 и показателем преломления $\hat{n}_3 = n_3 - iK_3$ (рис.2). Рассмотрим более подробно частные случаи сочетания оптических параметров пленки и подложки.

1.1. Прозрачная пленка на прозрачной подложке

Если поглощение в пленке и подложке отсутствуют, то коэффициенты отражения r_{13} и пропускания из пленки в подложку можно найти из выражений [2]:

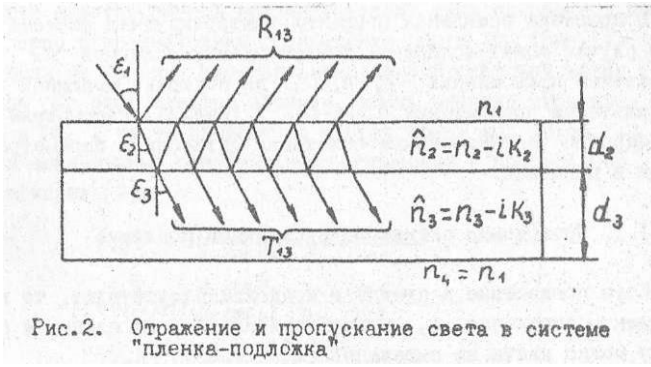
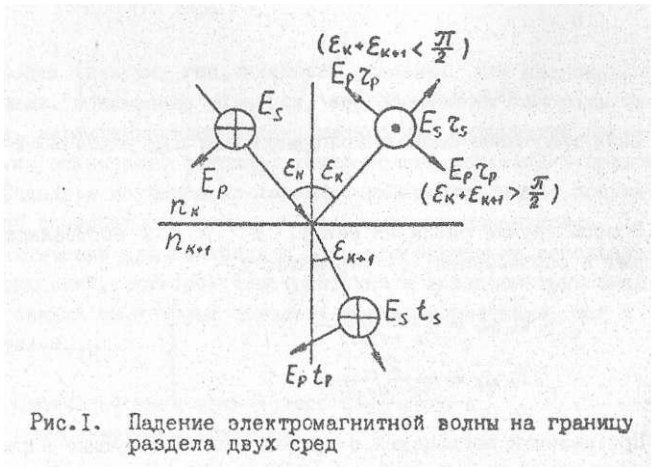
$$r_{13} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp 2i\beta}{1 + r_{12} r_{23} \exp 2i\beta} \quad (4)$$

$$t_{13} = \frac{t_{12} t_{23} \exp i\beta}{1 + r_{12} r_{23} \exp 2i\beta} \quad (5)$$

где r_{12} и r_{23} - амплитудные коэффициенты отражения на границах разделов "вакуум-пленка" и "пленка- подложка" соответственно, определяемые системой (1);

λ - длина волны излучения;

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \epsilon_2$$



Энергетические коэффициенты отражения R_{13} и пропускания T_{13} равны квадратам модулей соответствующих амплитудных коэффициентов:

$$R_{13} = |r_{13}|^2 = \frac{r_{11}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta} \quad (6)$$

$$T_{13} = \frac{n_3 \cos \epsilon_3}{n_1 \cos \epsilon_1} |t_{13}|^2 = \frac{n_3 \cos \epsilon_3}{n_1 \cos \epsilon_1} \cdot \frac{t_{12}^2 t_{23}^2}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta} \quad (7)$$

При падении по нормали можно записать [3]:

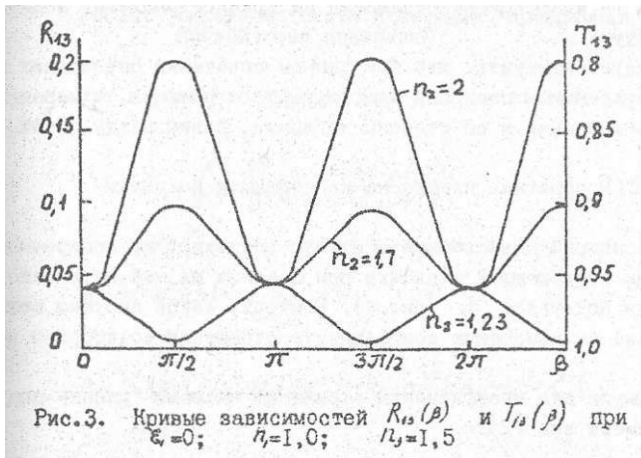
$$R_{13} = \frac{A - \sin^2 \beta}{B - \sin^2 \beta} \quad (8)$$

где $A = \frac{n_2^2 (n_1 - n_3)^2}{(n_1^2 - n_2^2)(n_2^2 - n_3^2)}$; $B = \frac{n_2^2 (n_1 + n_3)^2}{(n_1^2 - n_2^2)(n_2^2 - n_3^2)}$;

$$T_{13} = \frac{C}{\delta - \sin^2 \beta} \quad (9)$$

где $C = \frac{4n_1 n_2 n_3}{(n_1^2 - n_2^2)(n_2^2 - n_3^2)}$.

Примеры построенных по формулам (8), (9) зависимостей приведены на рис.3.



Функции $R_{13}(\beta)$ и $T_{13}(\beta)$ являются искаженными синусоидами с периодом, равным $\lambda/2$, причем экстремальные значения коэффициентов отражения и пропускания равны:

$$\left. \begin{aligned} R_{\max} &= \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2; & R_{\min} &= \left(\frac{n_1^2 - n_1 n_3}{n_1^2 + n_1 n_3} \right)^2; \\ T_{\max} &= \frac{4n_1 n_3}{(n_1 + n_3)^2}; & T_{\min} &= \frac{4n_1 n_2^2 n_3}{(n_1 n_2 + n_2^2)^2}; \\ R_{\max} &= \left(\frac{n_1^2 - n_1 n_3}{n_1^2 + n_1 n_3} \right)^2; & R_{\min} &= \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2; \\ T_{\min} &= \frac{4n_1 n_2^2 n_3}{(n_1 n_2 + n_2^2)^2}; & T_{\max} &= \frac{4n_1 n_3}{(n_1 + n_3)^2}. \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{при} \\ n_3 \leq n_2 \leq n_1 \quad \text{(I)} \\ \text{при} \\ n_3 \geq n_2 \geq n_1 \quad \text{(II)} \end{array}$$

Практически измеряются коэффициенты отражения R_{14} и пропускания T_{14} , учитывающие многократные отражения в подложке и равные в случае непоглощающих пленки и подложки:

$$R_{14} = R_{13} + \frac{R_{34} (1 - R_{13})^2}{1 - R_{34} R_{13}}, \quad (12)$$

$$T_{14} = T_{13} \cdot \frac{1 - R_{34}}{1 - R_{34} R_{13}}, \quad (13)$$

где R_{34} - коэффициент отражения на границе раздела "подложка - вакуум".

Следует отметить, что при данном сочетании оптических параметров пленки и подложки коэффициенты отражения, измеренные со стороны пленки и со стороны подложки, равны между собой,

1.2. Прозрачная пленка на поглощающей подложке

Рассмотрим двухслойную систему, состоящую из прозрачной пленки на поглощающей подложке при падении на нее оптического излучения под углом ε_k (рис.4). Контроль такой системы возможен только по измерению коэффициента отражения со стороны пленки.

Формула для коэффициента отражения системы "пленка-подложка" имеет вид [2]:

$$R_{13} = \frac{\chi_{12}^2 + |\chi_{23}|^2 + 2\chi_{12}\chi_{23}\cos(2\beta + \varphi_{23})}{1 + \chi_{12}^2/|\chi_{23}|^2 + 2\chi_{12}\chi_{23}\cos(2\beta + \varphi_{23})}, \quad (14)$$

где

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \varepsilon_2$$

$$2\chi_3^2 = n_3^2 - K_3^2 - n_2^2 \sin^2 \varepsilon_2 + \sqrt{(n_3^2 - K_3^2 - n_2^2 \sin^2 \varepsilon_2)^2 + 4n_2^2 K_3^2},$$

$$2\chi_2^2 = -(n_3^2 - K_3^2 - n_2^2 \sin^2 \varepsilon_2) + \sqrt{(n_3^2 - K_3^2 - n_2^2 \sin^2 \varepsilon_2)^2 + 4n_2^2 K_3^2},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{23p} = \frac{2n_2 n_3 \cos \varepsilon_2 \frac{2\chi_2^2 \chi_3 - (1 - K_3^2/n_2^2)\chi_3}{(n_3^2 + K_3^2) \cos \varepsilon_2 - n_2^2(\chi_2^2 + \chi_3^2)}}{2\chi_2 \chi_3 \cos \varepsilon_2},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{23s} = \frac{\chi_2^2 + \chi_3^2 - n_2^2 \cos^2 \varepsilon_2}{[(n_3^2 - K_3^2) \cos \varepsilon_2 - n_2 \chi_2]^2 + [2n_2 K_3 \cos \varepsilon_2 - n_2 \chi_3]^2},$$

$$|\chi_{23p}|^2 = \frac{[(n_3^2 - K_3^2) \cos \varepsilon_2 - n_2 \chi_2]^2 + [2n_2 K_3 \cos \varepsilon_2 - n_2 \chi_3]^2}{[(n_3^2 - K_3^2) \cos \varepsilon_2 + n_2 \chi_2]^2 + [2n_2 K_3 \cos \varepsilon_2 + n_2 \chi_3]^2},$$

$$|\chi_{23s}|^2 = \frac{(n_2 \cos \varepsilon_2 - \chi_2)^2 + \chi_3^2}{(n_2 \cos \varepsilon_2 + \chi_2)^2 + \chi_3^2}.$$

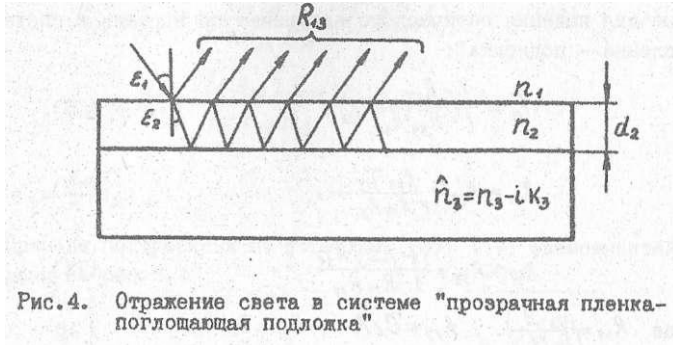


Рис. 4. Отражение света в системе "прозрачная пленка-поглощающая подложка"

При падении по нормали формула значительно упрощается [4] :

$$R_{13} = \frac{A + 2B \cos 2\beta - 4C \sin 2\beta}{D + 2B \cos 2\beta - 4C \sin 2\beta}, \quad (15)$$

где

$$A = (n_2 - n_1)^2 [(n_3 + n_2)^2 + \kappa_3^2] + (n_2 + n_1)^2 [(n_3 - n_2)^2 + \kappa_3^2],$$

$$B = (n_2^2 - n_1^2)(n_2^2 + \kappa_3^2 - n_2^2),$$

$$C = n_2 \kappa_3 (n_2^2 - n_1^2),$$

$$D = (n_1 + n_1)^2 [(n_3 + n_2)^2 + \kappa_3^2] + (n_1 - n_1)^2 [(n_3 - n_2)^2 + \kappa_3^2],$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} d_2 n_2.$$

Зависимость $R_{13} = f(d_2)$ в общем виде аналогична зависимости для коэффициента отражения прозрачной пленки на прозрачной подложке (рис.3). Основное отличие состоит в том, что экстремальные значения коэффициента отражения сдвигаются в сторону меньших толщин.

1.3. Поглощающая пленка на прозрачной или слабопоглощающей подложке

В случае поглощающей пленки на прозрачной или слабопоглощающей подложке соответствующие коэффициенты отражения и пропускания можно получить из формул (4)-(7) при замене действительных показателей преломления n_2 , и n_3 на комплексные.

Широко используются в расчетах формулы Мурмана [5], полученные для падения оптического излучения по нормали к системе "пленка - подложка":

$$T_{14} = \frac{1 - R_{34}}{1 - R_{34} R_{31}} T_{13}, \quad (16)$$

$$R_{14} = R_{13} + \frac{R_{34} T_{13}^2}{1 - R_{34} R_{31}}, \quad (17)$$

$$R_{41} = R_{34} + \frac{(1 - R_{34})^2 R_{31}}{1 - R_{34} R_{31}}, \quad (18)$$

где $R_{34} = \left(\frac{n_3 - 1}{n_3 + 1}\right)^2$, $R_{13} = C/A$, $R_{31} = B/A$,

$$T_{13} = \frac{16n_3(n_2 + \kappa_2^2)}{A},$$

$$A = \rho \tau e^{y\kappa_2} + \delta \zeta e^{-y\kappa_2} + 2S \cos n_2 y + 2t \sin n_2 y,$$

$$B = \zeta \rho e^{y\kappa_2} + \delta \tau e^{-y\kappa_2} + 2g \cos n_2 y - 2x \sin n_2 y,$$

$$C = \delta \tau e^{y\kappa_2} + \zeta \rho e^{-y\kappa_2} + 2g \cos n_2 y + 2x \sin n_2 y,$$

$$\delta = (n_2 - 1)^2 + \kappa_2^2,$$

$$g = (n_2^2 + \kappa_2^2)(1 + n_3^2) - (n_2^2 + \kappa_2^2)^2 - n_3^2 - 4n_3 \kappa_2^2,$$

$$\rho = (n_2 + 1)^2 + \kappa_2^2,$$

$$S = (n_2^2 + \kappa_2^2)(1 + n_3^2) - (n_2^2 + \kappa_2^2)^2 - n_3^2 + 4n_3 \kappa_2^2,$$

$$\zeta = (n_2 - n_3)^2 + \kappa_2^2,$$

$$x = 2\kappa_2(n_3 - 1)(\kappa_2^2 + n_2^2 + n_3),$$

$$\tau = (n_2 + n_3)^2 + \kappa_2^2,$$

$$t = 2\kappa_2(n_3 + 1)(\kappa_2^2 + n_2^2 - n_3),$$

$$y = 4\pi d_2 / \lambda.$$

Если подложка обладает слабым поглощением, то формулы (14)-(16) приобретают следующий вид:

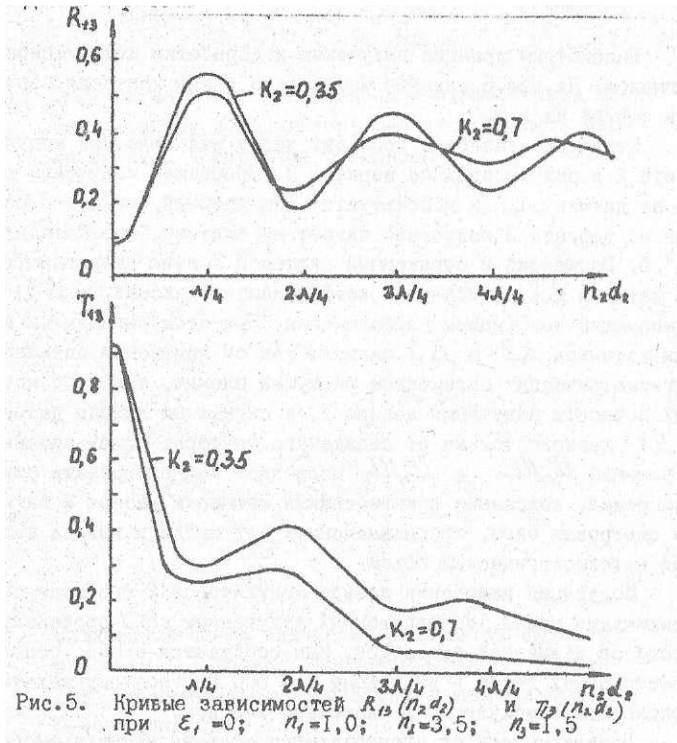
$$T_{14} = \frac{1 - R_{34}}{1 - R_{34} R_{31}} T_{13} (1 - \alpha_3 d_3), \quad (19)$$

$$R_{11} = R_{13} + \frac{R_{21} T_{12}^2}{1 - R_{34} R_{31}} (1 - 2\alpha_3 d_3), \quad (20)$$

$$R_{11} = R_{34} + \frac{(1 - R_{24})^2 R_{31}}{1 - R_{34} R_{31}} (1 - 2\alpha_3 d_3), \quad (21)$$

где $\alpha_3 = \frac{4\pi}{\lambda} k_3$.

Примеры построенных по формулам (16), (17) зависимостей приведены на рис. 5.



Из рисунка видно, что поглощение в пленке ведет к уменьшению как $T_{\text{пн}}$, так и $T_{\text{пк}}$, причем уменьшается и ам-

плитуда изменения коэффициента пропускания. Эти изменения тем значительнее, чем больше толщина слоя.

Что касается коэффициента отражения, то при $n_2 < n_3$ R_{14} убывает при целочисленном порядке интерференции ($n_2 d_2 = K\lambda/2$, где $K = 0, 1, 2, \dots$) и растет при полученном порядке интерференции ($n_2 d_2 = K\lambda/2 + \lambda/4$, где $K = 0, 1, 2, \dots$), а если $n_2 > n_3$, имеет место обратное.

2. Контроль параметров тонкопленочных покрытий в процессе осаждения

Рассмотрим принцип получения и обработки информационных сигналов. На рис.6 условно изображена схема контроля параметров тонкой пленки.

Излучение лазера 1 проходит через механический модулятор света 2 и полупрозрачное зеркало 3. Прошедшее излучение падает на датчик Д1 и используется как опорный сигнал. Отраженное от зеркала 3 излучение падает на систему "пленка-подложка" 5. Прошедший и отраженный системой 5 лучи направляются на датчики Д2, измеряющий коэффициент отражения, и Д3, измеряющий коэффициент пропускания. При этом сигналы на выходах датчиков Д2 и Д3 зависят как от изменения оптических и геометрических параметров растущей пленки, так и от колебаний мощности излучения лазера 1, а сигнал на выходе датчика зависит только от последнего фактора. Использование отношений U_2/U_1 и U_3/U_1 позволяет компенсировать ошибки измерения, связанные с колебаниями мощности лазера и запылением смотровых окон, предназначенных для ввода и вывода излучения в технологический объем.

Модуляция излучения лазера модулятором 2 необходима для исключения помех, обусловленных излучением зоны протекания процесса и внешней засветкой. Как сообщается в [6], основной спектр помех лежит в диапазоне 0 - 500 Гц, поэтому желательно использовать модуляцию с частотами 1-2 кГц,

В зависимости от спектрального состава используемого источника излучения и от измеряемых параметров этого излучения датчиками при контроле могут использоваться эллипсометрический, спектрофотометрический и фотометрический методы.

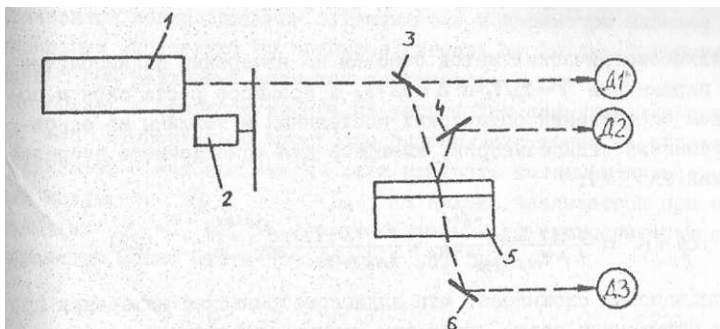


Рис.6. Оптическая схема контроля параметров тонкой пленки: 1-лазер; 2-модулятор; 3-полупрозрачное зеркало; 4, 6 - зеркала; 5-образец

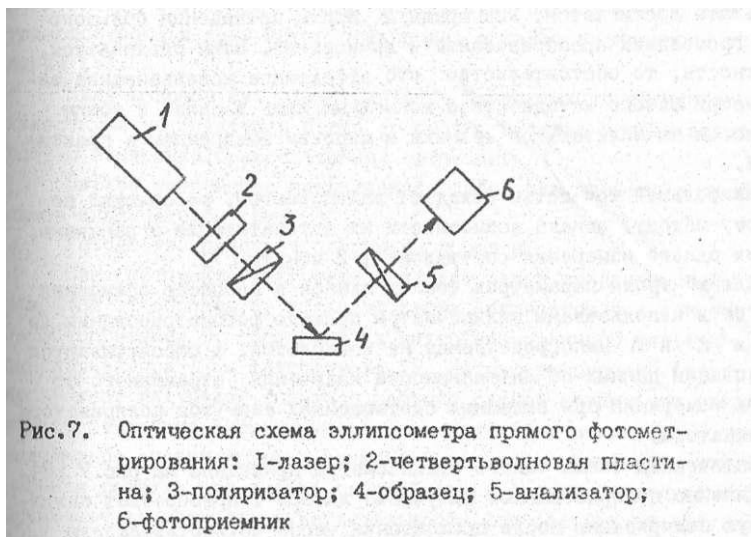


Рис.7. Оптическая схема эллипсометра прямого фотометрирования: 1-лазер; 2-четвертьволновая пластина; 3-поляризатор; 4-образец; 5-анализатор; 6-фотоприемник

2.1. Эллипсометрический метод контроля

Эллипсометрический метод основан на измерении эллипсометрических параметров $\Psi = \gamma_p / \gamma_s$ и $\Delta = \delta_p - \delta_s$ в процессе роста слоя и по следующему определении оптических постоянных и толщины из основного уравнения эллипсометрии, имеющего для однослойного покрытия следующий вид [7]:

$$\operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = \frac{\gamma_{12p} + \gamma_{23p} e^{-2i\delta}}{1 + \gamma_{12p} \gamma_{23p} e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + \gamma_{12s} \gamma_{23s} e^{-2i\delta}}{\gamma_{12s} + \gamma_{23s} e^{-2i\delta}} \quad (22)$$

Традиционно сложилось, что эллипсометрические измерения проводят в отраженном свете, хотя при наличии прозрачной подложки возможности эллипсометрии в проходящем свете не менее широки.

Решение обратной задачи эллипсометрии заключается в определении неизвестных параметров наносимого слоя по измеренным значениям Ψ и Δ путем решения одного или системы трансцендентных нелинейных уравнений в комплексной области. Получение конечного результата достигается, как правило, после проведения большого числа громоздких преобразований и вычислений. Этим объясняется, в частности, то обстоятельство, что эффективное использование эллипсометрического метода стало возможным лишь в связи с общим прогрессом вычислительной техники и широким внедрением в практику ЭВМ.

Наибольшей точностью обладают эллипсометры, работающие по нулевому методу, однако возможности их автоматизации ограничены, а время одного измерения составляет 1-2 минуты [7].

Для контроля параметров тонких пленок в процессе осаждения могут быть использованы эллипсометры прямого фотометрирования, в которых Ψ и Δ непосредственно не измеряются, а рассчитываются на основании данных об интенсивности излучения, отраженного от объекта измерений при заданных соотношениях азимутов поляризатора и анализатора.

Оптическая схема такого эллипсометра приведена на рис.7 [8].

Линейно поляризованное излучение лазера 1 приобретает эллиптическую поляризацию после прохождения через четвертьволновую пластину 2. Поляризатор 3 позволяет получить линейно поляризованное излучение в заданной плоскости, падающее на поверхность образца 4. При отражении от образца линейно поляризованное излучение

становится поляризованным эллиптически и параметры эллипса поляризации определяют по величине сигнала на выходе фотоприемника 6 при различных азимутах анализатора 5.

Пусть в процессе измерений установлен азимут поляризатора $\psi_n = 45^\circ$ относительно плоскости падения излучения на образец, а анализатор может вращаться. Если измерить величины интенсивностей излучения I_0, I_{45}, I_{90} на выходе анализатора при его азимутах $\psi_A = 0, 45, 90^\circ$ соответственно, то эллипсометрические параметры можно найти по формулам [8]:

$$\operatorname{tg} \Psi_n = \operatorname{tg} \psi_n \sqrt{I_0 / I_{90}}, \quad (23)$$

$$\cos \Delta = \frac{2I_{45} - I_0 - I_{90}}{2\sqrt{I_0 I_{90}}}. \quad (24)$$

Сегодня описан ряд эллипсометров прямого фотометрирования, позволяющих проводить контроль параметров пленок в ходе газотранспортного и вакуумного осаждения, а также жидкостного травления [9].

Ниже описаны два эллипсометра, обладающих по сравнению с известными устройствами более высокой точностью и производительностью измерений, разработанные авторами.

Первое устройство представляет собой эллипсометр с вращающимся анализатором (рис.8).

Устройство работает следующим образом.

Свет источника излучения проходит через поляризатор 2, отражается от образца 5, проходит через анализатор 6 и попадает на фотоприемник 9, состоящий из интерференционного фильтра 10, деполяризатора П и фотодатчика 12. Интерференционный фильтр пропускает излучение только с рабочей длиной волны, что увеличивает отношение сигнал/шум. Здесь может быть использован также какой-либо диспергирующий элемент, например, призма или дифракционная решетка для выбора рабочей длины волны. Деполяризатор исключает зависимость чувствительности фотодатчика от состояния поляризации падающего на него излучения.

Анализатор установлен на приводе и непрерывно вращается с частотой ω , зависящей от механической прочности анализатора и определяющей быстродействие устройства. Выход датчика 8 углового положения анализатора подключен к входу блока 17 синхрони-

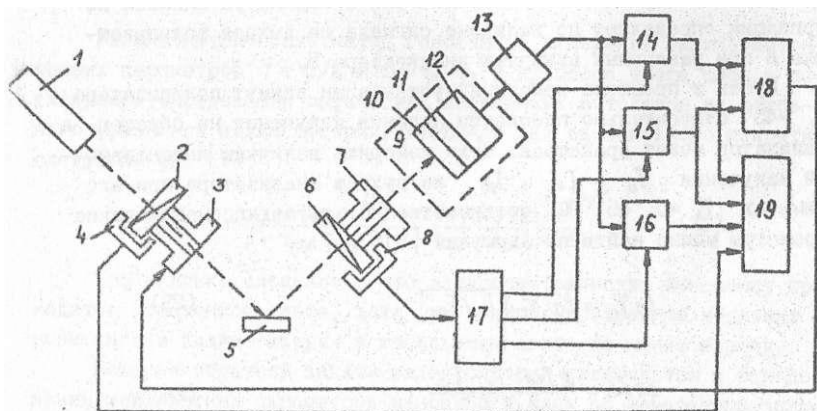


Рис.8. Эллисометр с вращающимся анализатором: 1-источник излучения; 2-поляризатор; 3-привод поляризатора; 4-датчик углового положения поляризатора; 5-образец; 6-анализатор; 7-привод анализатора; 8-датчик углового положения анализатора; 9-фотоприемник; 10-интерференционный фильтр; 11-деполяризатор; 12-фотодатчик; 13-усилитель; 14, 15, 16-блоки памяти; 17-блок синхронизации; 18-дифференциальный усилитель-ограничитель; 19-блок записи и обработки информации

зации.

Выход фотоприемника 9 подключен к входу усилителя 13, сигнал на выходе которого линейно связан с освещенностью фотодатчика 12. Этот сигнал поступает на первые входы блоков 14, 15, 16 памяти, вторые входы блоков 14, 15, 16 подключены к первому, второму и третьему выходам, соответственно, блока 17 синхронизации. Импульсы синхронизации на первом, втором и третьем выходах вырабатываются при азимутах анализатора $0, 90$ и 45° относительно плоскости падения излучения на образец и обеспечивают выборку и хранение аналоговых сигналов I_0 , пропорционально коэффициенту отражения R_p в блоке 14 памяти; I_{90} , пропорционального коэффициенту отражения R_s в блоке 15 памяти; I_{45} , пропорциональ-

ного разности фаз Δp - и s- составляющих излучения в блоке 16 памяти.

Выходы блоков 14 и 15 памяти подключены к входам дифференциального усилителя-ограничителя 18, полярность и уровень напряжения на выходе которого определяются соотношением сигналов I_0 и I_9 и обеспечивают вращение поляризатора 2 приводом 3 поляризатора в требуемом направлении до выполнения условия $I_0 = I_9$. При этом напряжения на входах дифференциального усилителя-ограничителя будут равны между собой, а напряжение на его выходе станет равным нулю, что приведет к установке поляризатора в положение, обеспечивающее максимальную точность измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ , определяемых по формулам:

$$\operatorname{tg} \Psi = \operatorname{tg} \Psi_n, \quad (25)$$

$$\cos \Delta = \frac{I_{45} - I}{I} - 1. \quad (26)$$

Если в процессе измерений параметры образца, 5 изменяются (например, ведется контроль параметров тонкой пленки в процессе осаждения), дифференциальный усилитель-ограничитель и привод поляризатора будут осуществлять непрерывную подстройку азимута поляризатора Ψ_n , что обеспечивает высокую точность измерений при любом изменении параметров, образца 5.

Выходы блоков 14, 15, 16 памяти и датчика 4 углового положения поляризатора подключены к входам блока 19 записи и обработки информации.

Эффективное использование описанного устройства возможно только при сопряжении его с ЭВМ, что позволит контролировать параметры тонкопленочных покрытий в процессе изготовления в реальном масштабе времени-

Ограниченное быстродействие устройства и сложность механического узла вращения анализатора ограничивают область применения эллипсометров с вращающимся анализатором.

На рис.9 приведена блок-схема устройства, разработанного на базе лазерного эллипсометра для исследования нестационарных процессов [10] и обладающего более высоким быстродействием.

Свет источника излучения I проходит через модулятор 2, поляризатор 3, отражается от образца 6 и разделяется светоделите-

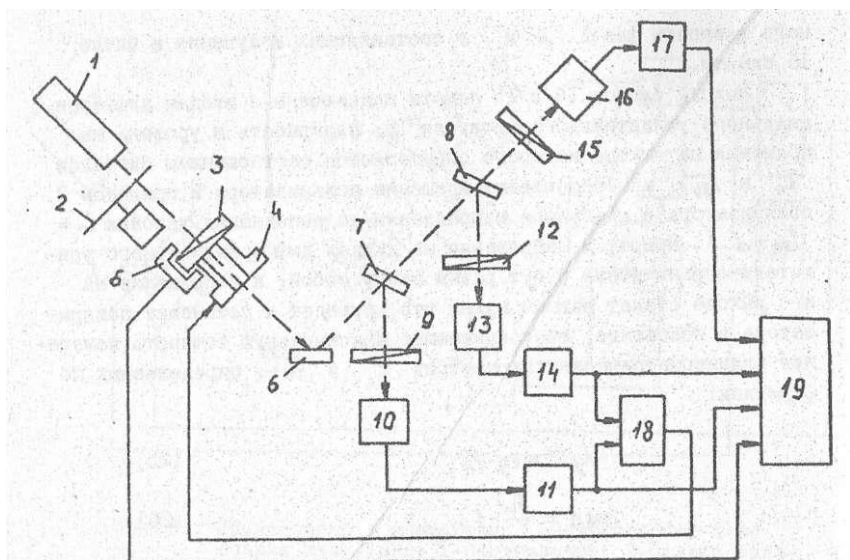


Рис.9. Эллипсометр прямого фотометрирования с повышенным быстродействием:

1-источник излучения; 2-модулятор; 3-поляризатор; 4-привод поляризатора; 5-датчик углового положения поляризатора; 6-образец; 7,8-светоделители; 9, 12, 15-анализаторы; 10, 13, 16-фотоприемники; 11, 14, 17-усилители; 18-дифференциальный усилитель-ограничитель; 19-блок записки и обработки информации

лями 7 и 8 на три луча. Первый луч проходит через анализатор 9 и падает на фотоприемник 10. Выход фотоприемника 10 подключен к входу усилителя 11, обеспечивающего выделение моделированного информационного сигнала на фоне помех и его демодуляцию. Азимут анализатора 9 равен 0° относительно плоскости падения излучения на образец, поэтому сигнал I_0 на выходе усилителя 11 пропорционален коэффициенту отражения R_p .

Второй луч проходит через анализатор 12 с азимутом 90° , падает на фотоприемник 13, подключенный к усилителю 14, сигнал

I_{90} на выходе которого пропорционален коэффициенту отражения R_3 . Выходы усилителей П и 14 подключены к входам блока 19 записи и обработки информации и к входам дифференциального усилителя - ограничителя 18, выход которого соединен с приводом 4 поляризатора. Как и в предыдущем устройстве, этим достигается автоматическая подстройка азимута поляризатора в процессе измерений в положении, обеспечивающем максимальную точность измерений.

Третий луч проходит через анализатор 15 с азимутом 45° , падает на фотоприемник 16, подключенный к усилителю 17, сигнал I_6 с выхода которого, пропорциональный разности фаз Δ , поступает в блок 19 записи и обработки информации.

Эллипсометрические параметры рассчитывают по формулам (25), (26).

Следует отметить, что точность данного устройства несколько ниже, чем у эллипсометра с вращающимся анализатором. Это связано в первую очередь, с наличием трех каналов преобразования и обработки оптического излучения и электрических сигналов, имеющих различную зависимость параметров от температуры и времени.

Для решения обратной задачи эллипсометрии разработан ряд методов, но время решения изменяется от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от количества неизвестных параметров и типа используемой ЭВМ [11]. Это обстоятельство сдерживает широкое использование эллипсометрического метода и требует разработки более эффективных алгоритмов поиска корней.

2.2. Спектрофотометрический метод

Спектрометрический метод основан на измерении коэффициентов пропускания и (или) отражения системы "пленка - подложка" в процессе осаждения в диапазоне длин волн. Для этого в используемое оборудование встраивают спектрофотометр или спектровизор.

В качестве примера на рис.10 приведена схема спектрофотометра РМА-3 фирмы **Leybold-Heraeus** [12], разработанного для производства многослойных оптических покрытий, содержащих главным образом слои с оптической толщиной $nd = \lambda/4$

Свет, излучаемый галогенной лампой I, проходит через модулятор 2 с частотой модуляции 127 Гц и падает на светоделитель 3 с коэффициентом пропускания $T=50\%$. Прошедший луч отражается

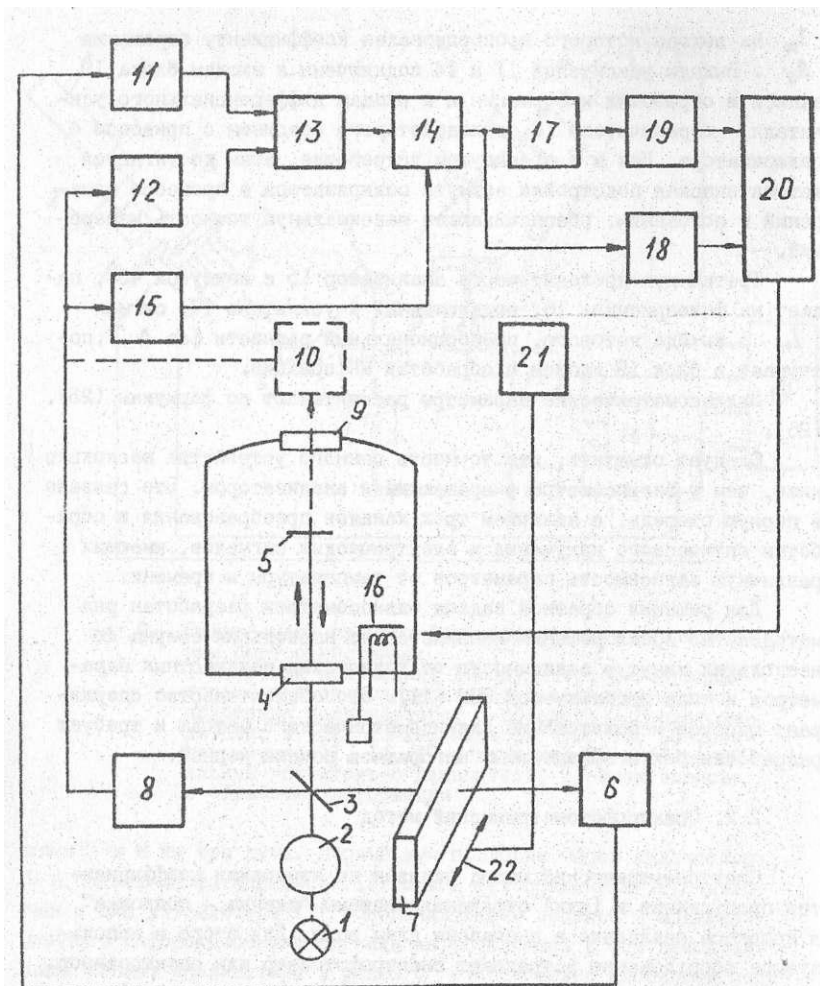


Рис. 10. Спектрофотометр РМА-3: 1-галогенная лампа; 2-модулятор; 3-светоделитель; 4,9-вакуумные окна; 5-свидетель; 6,8,10-фотодиоды; 7-перестраиваемый интерференционный фильтр; 11,12-избирательные предусилители; 13-дифференциальный усилитель; 14-фазочувствительный усилитель; 15-триггер; 16-заслонка; 17-дифференцирующий усилитель; 18-компаратор; 19-детектор нуля; 20-логический блок; 21-блок установки длины волны; 22-линейный шаговый двигатель

свидетелем 5, возвращается на светоделитель 3 и направляется им на кремниевый фотодиод 6, работающий в спектральном диапазоне 400-1100 нм. Перед фотодиодом установлен перестраиваемый интерференционный фильтр 7, пропускающий выбранную длину волны λ .

Второй луч направляется светоделителем на фотодиод 8 и используется в качестве опорного сигнала.

Для измерения коэффициента пропускания свидетеля в рабочей камере устанавливают дополнительное вакуумное окно 9. Луч, прошедший через свидетель и вакуумное окно 9 падает на фотодиод 10, перед которым также установлен перестраиваемый интерференционный фильтр.

Сигналы с фотодиодов 6 и 8 поступают на два избирательных предусилителя 11 и 12, усиление которых можно регулировать в широким пределах. После предварительного усиления сигналы вычитаются в дифференциальном усилителе 13 и поступают на фазочувствительный фотометрический усилитель 14. Напряжение для запуска триггера 15, управляющего его работой, получают из опорного сигнала.

Выходной сигнал фотометрического усилителя поступает на дифференцирующий усилитель 17 и компаратор 18. Постоянная времени дифференцирующего усилителя может изменяться в широком диапазоне (10-999 с).

Выход дифференцирующего усилителя подключен к детектору нуля 19, который фиксирует оптическую толщину пленки *na* поверхности свидетеля, кратную $\lambda/4$.

Когда коэффициент отражения образца достигает определенного значения, компаратор 18 вырабатывает сигнал, который поступает на логический блок 20, закрывающий заслонку 16 и прекращающий процесс нанесения покрытия.

Перестраиваемый интерференционный фильтр работает в диапазоне длин волн 400-700 нм и позволяет устанавливать длину волны с точностью 1 нм и шириной полосы 10-20 нм.

Вместо перестраиваемого интерференционного фильтра может использоваться монохроматор с дифракционной решеткой, работающий в диапазоне длин волн 200-3000 нм и обеспечивающий установку длины волны с точностью 1 нм и шириной полосы 0,3 нм.

Спектрофотометры позволяют измерять параметры покрытий на одной, заранее выбранной длине волны. Для измерения спектральных

характеристик в процессе осаждения используются спектровизоры, которые регистрируют и оценивают спектр с частотой сканирования, составляющей сотни Герц.

Рис.11 показывает принцип работы спектровизора SPA-2 .

Свет галогенной лампы I проходит через свидетель 2 в световод 3 и направляется на дифракционный спектрограф 5. Сформированный оптический спектр отражается на ряд кремниевых фотодиодов 6, содержащий 256 отдельных ячеек, подключенных к блоку электронного сканирования 7.

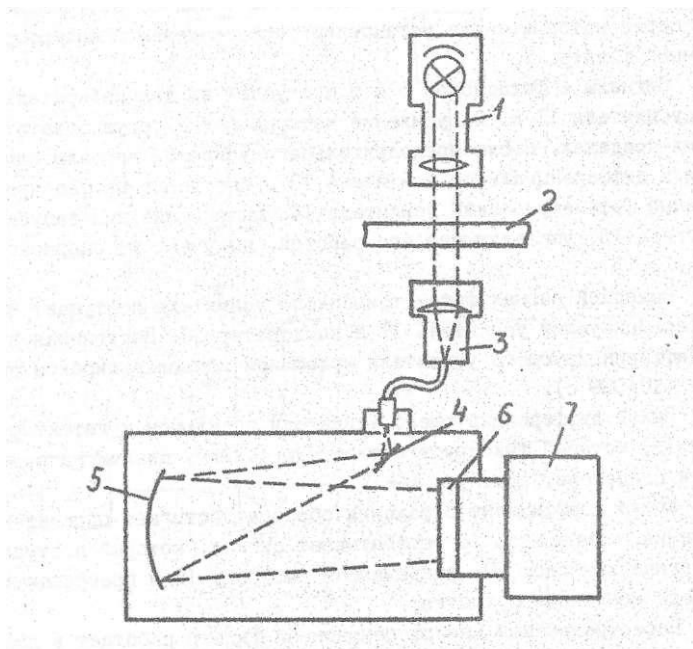


Рис.11. Спектровизор SPA-2 : 1-источник излучения; 2-свидетель; 3-световод; 4-зеркало; 5-дифракционный спектрограф; 6-фотодиодная матрица; 7-блок электронного сканирования

Выходной сигнал можно наблюдать на экране дисплея. Период сканирования не превышает 2 мс.

В процессе осаждения возможен непрерывный контроль толщины и показателя преломления наносимого слоя. Для диэлектриков измеряемым параметром может являться, например, отношение коэффициента отражения к коэффициенту пропускания T_{14} [13]. Для поглощающих пленок можно измерять отношения коэффициентов отражения со стороны пленки R_{14} и со стороны подложки R_{41} к коэффициенту пропускания R_{14} [14]. Показатель преломления и толщину в обоих случаях определяют из анализа вида дисперсионных кривых, построенных для вероятных значений толщины слоя, с точностью 2 и 0,5 % соответственно.

Сложность и длительность расчетов с использованием ЭВМ и значительное усложнение технологического оборудования ограничивают применение спектрофотометрического метода для определения оптических постоянных тонких пленок в процессе осаждения. Обычно он используется при нанесении оптических покрытий для качественного контроля на различных длинах волн (например, фиксации экстремумов) или измерения спектра пропускания или отражения изделия.

2.3. Фотометрический метод

Фотометрический метод контроля основан на измерении коэффициентов пропускания и (или) отражения системы "пленка-подложка" на фиксированной длине волны.

Устройства, реализующие метод, не требуют использования подложных механических узлов, необходимых при проведении эллипсометрических и спектрофотометрических измерений, что значительно упрощает систему контроля.

Необходимость измерения абсолютных значений коэффициентов пропускания и отражения обуславливает требование высокой помехоустойчивости схемы обработки сигналов. Например, при термическом вакуумном напылении отношение мощности излучения испарителя к мощности зондирующего сигнала составляет величину порядка 10^6 .

Для решения задачи разработан ряд устройств, в т.ч. двух-канальный фотометр [15], блок-схема которого приведена на рис. 12.

Устройство работает следующим образом.

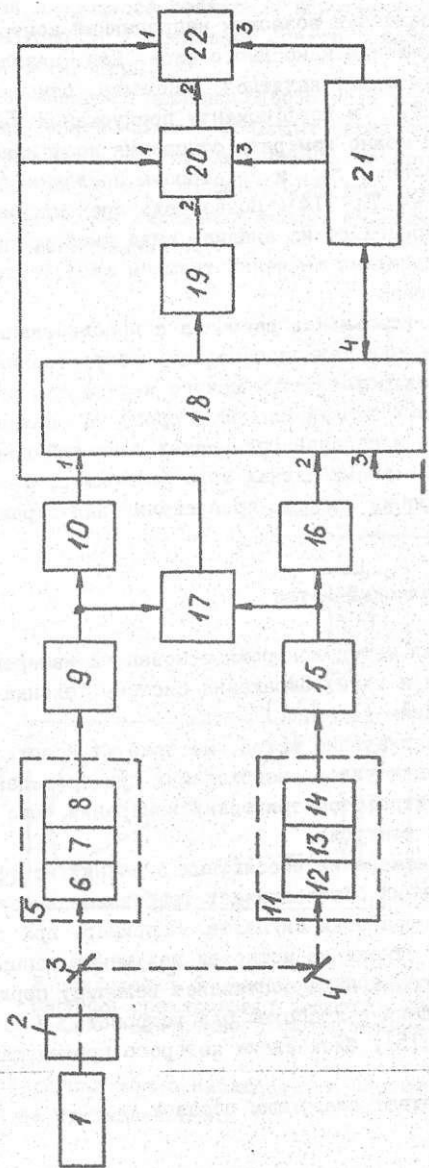


Рис. 12. Двухканальный фотометр: 1-источник излучения; 2-модулятор; 3-светоделитель; 4-зеркало; 5, 11-фотопреобразователи; 6, 12-интерференционные фильтры; 7, 13-рассеиватели; 8, 14-фотодиоды; 9, 15-преобразователи тока в напряжение; 10, 16-инвертные усилители; 17-блок индикации перегрузки; 18-коммутатор; 19-детектор; 20-блок преобразования; 21-блок управления; 22-регистратор

Свет источника I излучения проходит через модулятор 2 и падает на светоделитель 3. Первый луч проходит через технологическую среду и контролируемый объект и преобразуется в первом канале устройства, состоящем из фотопреобразователя 5, преобразователя 9 тока в напряжение, избирательного усилителя 10. Светочувствительный элемент 8 выполнен в виде фотодиода, работающего в режиме генератора тока.

Второй канал устройства состоит из фотопреобразователя II, преобразователя 15 тока в напряжение, избирательного усилителя 16 и работает аналогично первому, но излучение, сформированное отражателем 4 и падающее на фотопреобразователь II, не проходит через контролируемый объект. Второй канал является опорным и позволяет исключить погрешность измерений, связанную с колебаниями мощности источника I излучения.

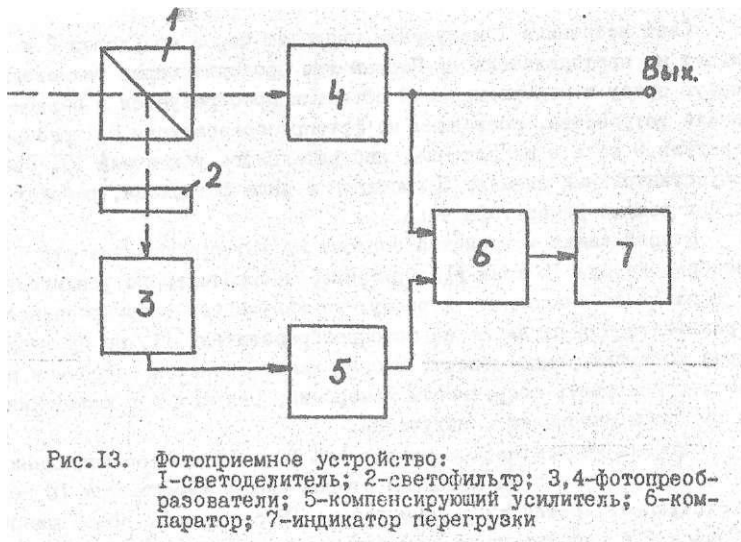
Сигналы избирательных усилителей 10 и 16 в виде напряжений U_1 и U_2 поступают на первый и второй входы коммутатора 18 соответственно. Третий вход коммутатора 19 соединен с общей шиной устройства и напряжение на нем равно нулю. С выхода коммутатора 18 сигнал поступает на детектор 19. При соединении входа детектора через коммутатор с общей шиной устройства напряжение U_3 ; поступающее на второй вход блока 20 преобразования, является аддитивной погрешностью детектора. Елок преобразования определяет величины напряжений $U'_1 = U_1 - U_3$ и $U'_2 = U_2 - U_3$ и величину $T = \kappa U'_1 / U'_2$ (κ - постоянный коэффициент), характеризующую свойства контролируемого объекта.

Выход блока преобразования соединен с вторым входом регистратора 22, фиксирующего и отображающего результаты измерений.

Блок 17 индикации перегрузки может запрещать работу блоков 20 и 22 и повышает достоверность получаемой информации за счет исключения некорректных измерений.

Для контроля линейности преобразования интенсивности оптического излучения в электрический сигнал можно использовать фотоприемное устройство с двумя фотодатчиками (рис.13), разработанное авторами.

Входное излучение с переменной интенсивностью падает на светоделитель I и образует два луча, один из которых падает на фотопреобразователь 4, а второй через светофильтр 2 на фотопреобразователь 3. Сигнал с выхода фотопреобразователя 3 поступает



на компенсирующий усилитель 5, коэффициент усиления которого $K < K_1 \cdot K_2$, где K_1 - отношение интенсивности излучения на первом выходе светоделителя к интенсивности излучения на втором выходе светоделителя, а K_2 - коэффициент ослабления светофильтра.

Если фотопреобразователь 4 не перегружен, напряжение на его выходе равно или больше напряжения на выходе компенсирующего усилителя. При этом сигнал на выходе компаратора 8 отсутствует. Когда интенсивность измеряемого излучения становится больше допустимой для фотопреобразователя 4, напряжение на выходе устройства начинает увеличиваться в меньшей степени, чем входная освещенность, к напряжению на выходе компенсирующего усилителя становится больше напряжения на выходе фотопреобразователя 4.

При достижении значения разности $U_5 - U_4 > U_{пор}$ ($U_{пор}$ определяется чувствительностью компаратора) срабатывает компаратор 6 и включает индикатор 7 перегрузки.

Регулировкой коэффициента усиления блока 5 можно устанавливать допустимую погрешность измерений. Если $K = K_1 \cdot K_2$, точность измерений максимальна. Если $K < K_1 \cdot K_2$ то меньшему отно-

шению $K/K_1 \cdot K_2$ соответствует меньшая точность измерений.

Большое количество примеров использования фотометрического контроля приведено в сборнике [16], а способов обработки результатов измерений - в сборнике [17].

При осаждении оптических покрытий значения коэффициентов отражения или пропускания в нечетных экстремумах позволяют определять показатель преломления слоя по формуле [17]:

$$n_2 = \sqrt{\frac{R_1 R_2 (1 + \sqrt{R_{\text{экс}}})}{1 - \sqrt{R_{\text{экс}}}}} \quad (27)$$

Погрешность расчета n_2 запишем в виде:

$$\Delta n_2 = \frac{\partial n_2}{\partial R_{\text{экс}}} \cdot \Delta R_{\text{экс}}, \quad (28)$$

$$\delta n_2 = \frac{\delta n_2}{\delta R_{\text{экс}}} \cdot \delta R_{\text{экс}} = \frac{R_{\text{экс}}}{n_2}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial R_{\text{экс}}} = \frac{\sqrt{n_1 n_2}}{2 \sqrt{R_{\text{экс}} (1 - R_{\text{экс}})} \cdot (1 - \sqrt{R_{\text{экс}}})} \quad (30)$$

График функции $\partial n_2 / \partial R_{\text{экс}}$ приведен на рис .14.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что погрешность определения показателя преломления пленки будет больше погрешности измерения коэффициента отражения, т.к. производная $\partial n_2 / \partial R_{\text{экс}}$ в любой точке больше единицы. Наибольшая ошибка определения n_2 будет в той точке, где показатель преломления пленки равен геометрическому среднему из произведения показателей преломления обрамляющих ее сред.

Из формул (8), (9) можно в явном виде получить выражения для толщины пленки:

$$d_2 = \frac{\lambda}{2\pi n_2} \arcsin \sqrt{\frac{R_{12} B - A}{R_{12} - 1}}, \quad (31)$$

$$d_2 = \frac{\lambda}{2\pi n_2} \arcsin \sqrt{B - \frac{C}{T_3}}. \quad (32)$$

При контроле параметров тонкопленочных покрытий фотометрическим методом в качестве источника излучения используют лампы

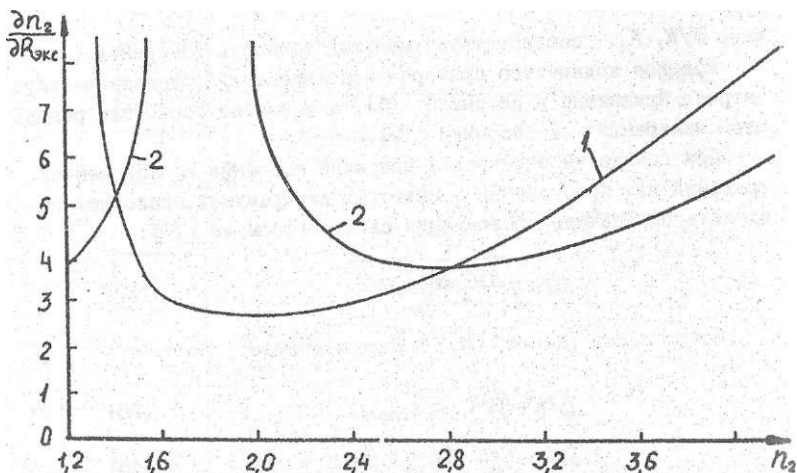


Рис. 14. График функции $\frac{\partial n_2}{\partial R_{\text{экс}}}$ при $n_1 = 1,0$; $n_3 = 1,5$ (кривая 1); $n_3 = 3,0$ (кривая 2)

накаливания или лазеры [16].

Излучение ламп накаливания вследствие случайного характера спонтанных переходов монохроматично, ненаправлено и неполяризовано. Обычно они используются в спектрофотометрах или при контроле толщины металлических покрытий по измерению коэффициента пропускания для белого света.

Лазеры генерируют монохроматическое когерентное излучение с малой расходимостью пучка и могут успешно использоваться в устройствах оптического контроля. Недостатками лазеров являются относительно высокая стоимость, необходимость использования высоких напряжений, существенные габариты.

Авторами был проведен анализ возможности использования светодиодов в устройствах оптического контроля параметров тонкопленочных покрытий в процессе осаждения.

Светодиоды генерируют излучение в диапазоне длин волн 0.53-0.95 мкм с полушириной спектра 10-30 нм и с шириной диаграммы направленности 20° и более. Полная мощность излучения светодиодов может достигать 60 мВт. Следует также отметить малые габариты светодиодов, низкое напряжение питания, простоту модуляции напряжения по мощности, устойчивость к механическим воздействиям.

В качестве примера на рис.15 приведены зависимость мощности излучения от длины волны и диаграмма направленности светодиода АЛ107 [18].

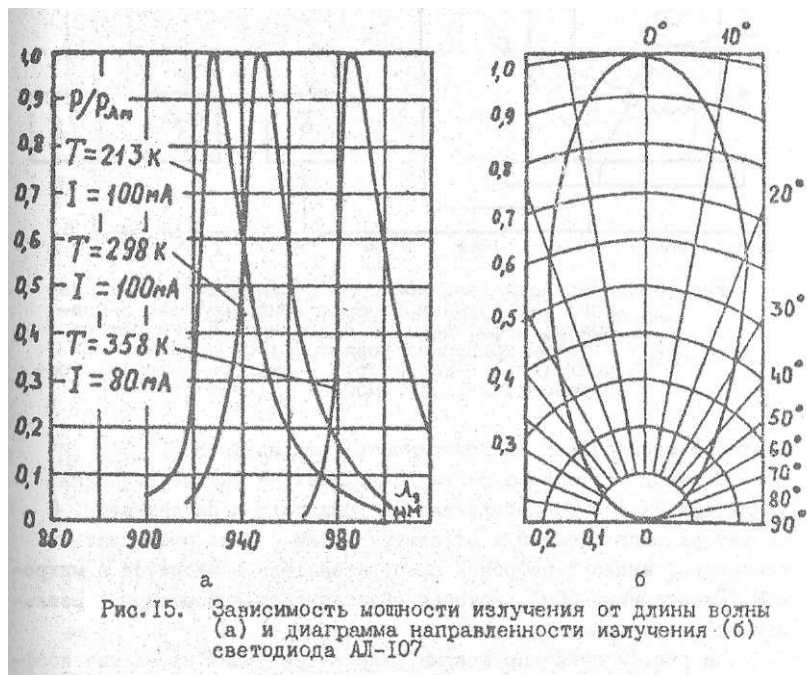


Рис. 15. Зависимость мощности излучения от длины волны (а) и диаграмма направленности излучения (б) светодиода АЛ-107

Из первого рисунка видно, что длина волны в максимуме спектральной характеристики является функцией температуры. С целью снижения влияния этого фактора температура светодиода, должна поддерживаться постоянной в течение всего процесса осаждения покрытия.

Практически на базе установки УВН-2М-1 было реализовано устройство для контроля параметров тонких пленок (рис.16).

Задавший генератор вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой 1500 Гц, поступающие на светодиод АЛ107Б с длиной волны в максимуме спектральной характеристики 0,95 мкм. Для защиты от излучения испарителя и заплыения он установлен в экран. Излучение светодиода проходит через подложку с напыляемым слоем.

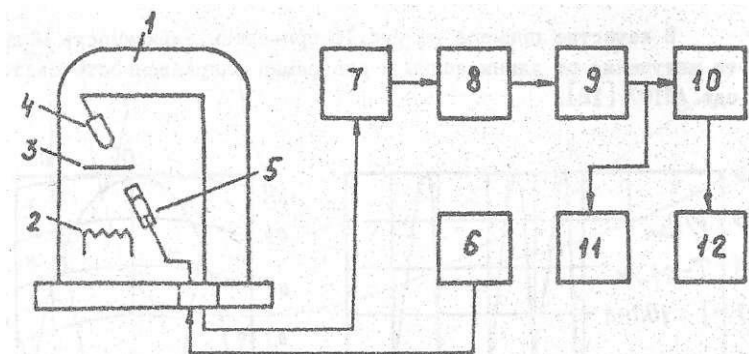


Рис. 16. Устройство для контроля параметров тонких пленок: 1-вакуумная камера; 2-испаритель; 3-подложка; 4-фотодиод; 5-светодиод; 6-генератор; 7-фотометрический усилитель; 8-избирательный усилитель; 9-детектор; 10-аналого-цифровой преобразователь; 11-самописец; 12-микро-ЭВМ

светофильтр и падает на поверхность фотодиода ФКДП.

С выхода фотодиода сигнал поступает на фотометрический усилитель, затем на избирательный усилитель и на детектор. С детектора выпрямленный и отфильтрованный сигнал поступает на самописец, аналого-цифровой преобразователь и вводится в микро-ЭВМ "Электроника-60м", которая обрабатывает информацию в реальном масштабе времени.

На рис. 17 показаны кривые, характеризующие изменение коэффициента пропускания системы "пленка-подложка" при увеличении толщины пленки. Для источника монохроматического излучения кривая является искаженной косинусоидой с постоянной амплитудой. Если используется источник частично когерентного излучения, например светодиода, то амплитуда колебаний сигнала уменьшается с ростом толщины слоя.

Методом термического вакуумного напыления на стеклянные подложки осаждали слоя Se , $CdSe$, Sb_2S_3 (рис. 18). Несимметричность полученных кривых и постепенное смещение их вниз связаны с нагревом светодиода излучением испарителя и уменьшением генерируемой мощности, которое не учитывалось в процессе роста слоя.

Показатель преломления слоя рассчитывали по величине коэффициента пропускания в первом экстремуме. Затем определяли гео-

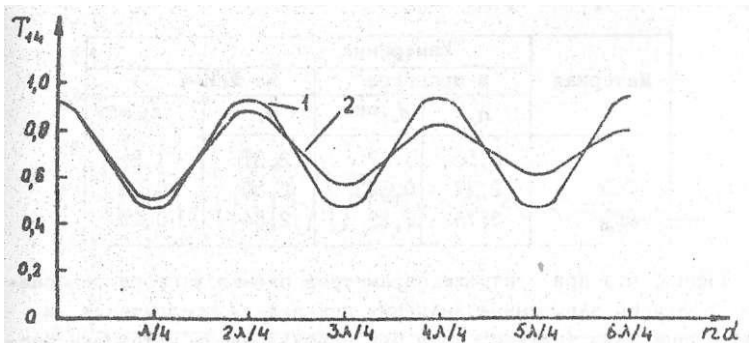


Рис. 17. Изменение коэффициента пропускания системы "пленка-подложка" при увеличении толщины пленки и использовании источника когерентного (1) и частично когерентного (2) излучения

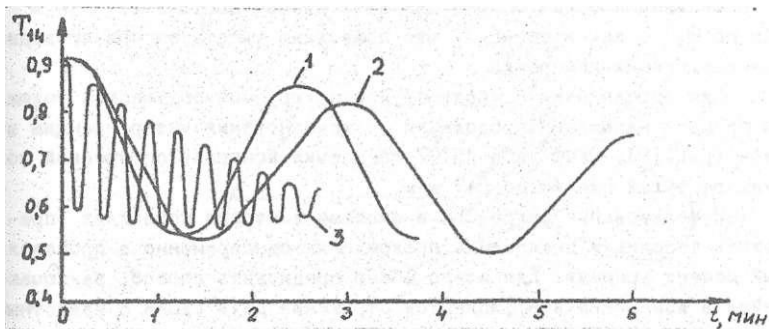


Рис. 18. Изменение коэффициента пропускания в процессе осаждения пленок Sb_2S_3 (1), $CdSe$ (2), Se (3)

метрическую толщину слоя в экстремальных точках:

$$d_2 = K\lambda/4n_2 \quad (33)$$

где K - порядок интерференции.

Процесс осаждения слоя прекращали по достижении оптической толщины, кратной $K\lambda/4$, и измеряли геометрическую толщину пленки на микроинтерферометре МИИ-4. Подставив полученное значение в формулу (33), рассчитывали показатель преломления слоя.

Результаты измерений представлены в таблице.

Материал	Измерения			
	в процессе		на МИИ-4	
	n_2	d_2 , мкм	n_2	d_2 , мкм
Se	2,56	1,67	2,31	1,85
CdSe	2,77	0,343	2,50	0,38
Sb ₂ S ₃	2,74	0,26	2,54	0,28

Видно, что при контроле параметров пленки в процессе осаждения получены завышенные значения показателя преломления и меньшие значения толщины, хотя при использовании источника частично когерентного излучения следовало ожидать обратного результата. Указанные отклонения связаны с тем, что коэффициент пропускания измеряли не при нормальном падении излучения, а под углом $\varphi = 15^\circ$, и из-за увеличения длины волны в максимуме спектральной характеристики светодиода при его нагреве»

Систематическая ошибка для всех пленок составляла 8 - 10 % как по n_2 , так и по d_2 , что позволило учесть ее при проведении дальнейших измерений.

Для определения наибольшей контролируемой оптической толщины процесс напыления продолжали до исчезновения интерференции в слое (рис.19). Светодиод АЛ107 обеспечил контроль оптической толщины растущей пленки до 5-7 мкм.

Использование микро-ЭВМ в системе контроля позволяет определять толщину и показатель преломления одновременно в произвольный момент времени. Для этого можно предложить способ, заключающийся в измерении коэффициентов отражения двух слоев с известным отношением толщин, осаждаемых одновременно. Устройство, реализующее указанный подход, изображено на рис.20.

Излучение лазера I проходит через полупрозрачное зеркало 2 и разделяется на два луча, первый из которых отражается от пленки толщиной d_2 и выводится из зоны протекания процесса зеркалом 3. Второй луч при помощи зеркала 4 направляется на пленку толщиной $d_2' = d_2/K$ выводится зеркалом 5.

Поток пара 9 осаждается на одну часть подложки непрерывно, а на вторую - через прерыватель, состоящий из электродвигателя 6 и диска 7 с вырезанным сектором. Отношение площади диска к площади сектора определяет коэффициент K и, следовательно, от-

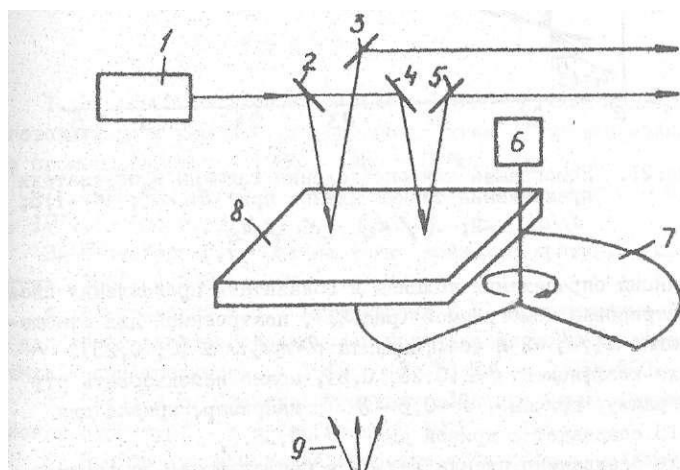


Рис. 20. Схема формирования сигналов в устройстве для контроля толщины и показателя преломления тонкой пленки: 1-лазер; 2-полупрозрачное зеркало; 3, 4, 5-зеркала; 6-электродвигатель; 7-диск прерывателя; 8-подложка; 9-поток пара

ношение толщин d_1/d_2 . Устройство можно использовать только в процессах термического вакуумного напыления, когда молекулы испаряемого вещества движутся по прямолинейным траекториям.

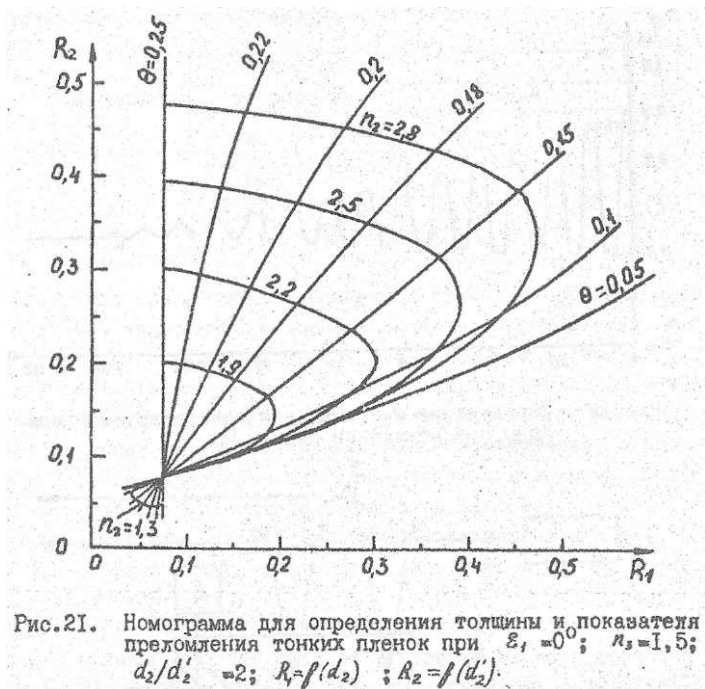


Рис.21. Номограмма для определения толщины и показателя преломления тонких пленок при $\varepsilon_1 = 0$; $n_1 = 1,5$; $d_2/d_1 = 2$; $R_1 = f(d_2)$; $R_2 = f(d_1)$.

Принцип определения толщины и показателя преломления слоя проиллюстрирован номограммой (рис.21), построенной для отношения толщин $d_2/d_1 = 2$ и коэффициента $\theta = n_2 d_2 / \lambda \in [0; 0,25]$.

Если коэффициент $\theta' \in [0,25; 0,5]$, можно использовать эту же номограмму, причем $\theta' = 0,5 - \theta$, например, кривая для $\theta = 0,15$ совпадает с кривой для $\theta' = 0,35$. Если осаждаемая пленка является поглощающей, то фотометрический метод позволяет определять n_2 и k_2 по значениям коэффициента отражения в двух соседних экстремумах [19], или по значениям коэффициента пропускания и коэффициента отражения в экстремуме отражения [20].

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что фотометрический метод позволяет контролировать параметры тонкопленочных покрытий в процессе осаждения без использования сложной аппара-

туры. Математические соотношения, связывающие значения коэффициентов отражения и пропускания с параметрами растущего слоя, проще, чем при эллипсометрических и спектрофотометрических измерениях, т.е. он является наиболее удобным для практического использования.

Приведенные результаты исследований позволяют сделать вывод о перспективности использования оптических методов контроля при изготовлении тонкопленочных покрытий. Несмотря на то, что эти методы применимы в первую очередь для контроля пленок, предназначенных для использования в оптике, их можно успешно применять при изготовлении пленок, используемых в качестве проводников, диэлектриков и полупроводников в микроэлектронике.

Для выбора метода контроля и его аппаратурной реализации необходимо оценить требуемую точность измерений и параметры покрытия, которые нужно контролировать.

Л и т е р а т у р а

1. Каплан Р.Б., Холоднов В.М. Компенсационные фильтры, изготовленные с помощью кварцевого датчика // Оптико-механическая промышленность. - 1985. - №8. - С.56.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. - М.: Наука, 1970. - 856 с.
3. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. - М.: Физ- матгиз, 1958. - 568 с.
4. Шкляревский И.Н., Шкляревский И.И. Приближенные формулы для коэффициентов отражения и пропускания тонких пленок // Оптика и спектроскопия. - 1969. - Т. 37, №4. - С.654-660.
5. Раков А.В. Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур. - М.: Сов. радио, **1975**. - 176 с.
6. Прибор для измерения скорости конденсации, толщины и удельного сопротивления тонких резистивных и проводящих пленок / О.П.Глудкин, А.Е.Густов, А.Р.Обичкин, А.Н.Черняев // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. - 1977. - Вып.1. - С.99-103.
7. Громов В.К. Введение в эллипсометрию: Учеб.пособие. - Л.: изд-во Ленингр. ун-та, 1986. - 192 с.
8. Исследование методом эллипсометрии поверхности оптических материалов после механической обработки / Т.В.Владими-

рова, В.П.Маслов, А.А.Одарич, М.М.Скачков // Оптико-механическая промышленность. - 1981. - №1. - С.60.

9. Эллисометрия диэлектрических слоев в процессе их формирования / Д.И.Биленко, Б.А.Дворкин, В.П.Полянская, С.Н.Краснобаев // Эллисометрия - метод исследования поверхности. -Новосибирск, 1983. - С.89-93.

10.Биленко Д.И., Дворкин Б.А. Лазерный эллисометр для исследования нестационарных процессов // Приборы и техника эксперимента. - 1980. - №4. - С.188-190.

11.Финарев М.С. Решение обратной эллисометрической задачи на микро-ЭВМ // Эллисометрия - метод исследования поверхности. - Новосибирск, 1963. - С.22-25.

12. *Optical monitoring of thin films: Prospect / Laybold - Horaceur. - 1980. - 19p.*

13. *Khawaja E.E. The determination of the refractive index and thickness of a transparent film // J Physics Dept. Applied Physics. - 1976. - Vol. 9, №14. - P. 1939-1949*

14. *Nagendra C.L. Thutupalli G.K. Optical constants of absorbing films // Vacuum. - 1981 - Vol. 31, №3 - P 141-145.*

15. А.С. 1442839 СССР, МКИ G01J 1/44. Двухканальный фотометр / С.О.Куприянов, Ю.Н.Новиков. - Оpubл. 1988, Бюл. №45.

16. Глудкин О.П., Густов А.Е. Устройства и методы фотометрического контроля в технологии производства ИС. - М.: Радио и связь, 1981. - 112 с.

17.Комраков Б.М., Шапочкин Б, А. Измерение параметров оптических покрытий. - М.: Машиностроение, 1986. - 136 с.

18.Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник / А.В.Баюков, А.Б.Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; Под общ. ред. Горюнова Н.Н. - М.: Энергоиздат, 1982. - 744 с.

19. *Doligy P. Optical method for investigation alkali antimonide photocathodes // Vacuum. - 1980. - Vol. 30, №11/12. - P. 489-495.*

20. *Howitz C.M. Refractive index determination using reflectance extrema // Applied Optics. - 1978 - Vol. 17, №11. - P. 1774-1775.*

ОПЛАВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЯ ОЛОВО-СВИНЕЦ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

В качестве металлического резиста в производстве печатных плат (ПП) применяется целый ряд покрытий, однако наиболее широкое применение в настоящее время находит покрытие олово-свинец (ОС). Оно характеризуется повышенной коррозионной стойкостью, химической стойкостью, достаточно хорошей паяемостью. Однако гальванически нанесенное покрытие олово-свинец имеет пористую структуру, быстро окисляется, теряет способность к пайке. Используются различные способы повышения паяемости ПП и ее сохранения: покрытие плат сплавом Розе, покрытие плат припоем ПОСВ-33, консервация флюсами, горячее лужение ПП припоем ПОС-61, оплавление на автоматизированных поточных линиях, использующих для передачи тепла синтетические жидкости и масла [1], нанесение гальванического припоя с последующим сплавлением в инфракрасных (ИК) лучах [2]. В настоящее время наиболее широкое применение нашло жидкостное и инфракрасное оплавление.

Жидкостное оплавление обладает большим количеством недостатков, таких как пожароопасность, сложность утилизации отработанной жидкости, быстрое ее загрязнение и, вследствие этого, частая ее замена, загрязненность производственного помещения, сложность отмывки ПП после оплавления и, как результат этого, уменьшение сопротивления изоляции. Поэтому наиболее перспективным является ИК оплавление. Процесс оплавления гальванического покрытия ОС ИК нагревом позволяет получить сравнительно толстые оплавленные покрытия, что способствует наиболее длительному сохранению хорошей паяемости. Этот способ является высокопроизводительным и повышает культуру производства.

Сущность ИК оплавления заключается в том, что с помощью подбора условий нагрева и охлаждения покрытия ОС происходит изменение физического состояния и кристаллической структуры покрытия (рис.1).

Основными дефектами, встречающимися в процессе ИК оплавления покрытия ОС, являются [3]: неполное растекание покрытия, тонкая кристаллическая структура покрытия, неполное оплавление

покрытия по толщине (поверхностное оплавление) и по поверхности ПП, потемнение диэлектрика, снижение сопротивления изоляции, термодеструкция диэлектрика, коробление ПП и расслаивание многослойных ПП (МПП).

Неполное растекание покрытия ОС связано с неоднородностью и недостаточной массой (толщиной) осажденного покрытия.

Тонкая кристаллическая структура покрытия ОС, свидетельствующая о наличии напряжения в металлической структуре, говорит о слишком быстром охлаждении покрытия, что происходит при превышении оптимальной скорости движения конвейера установки ИК оплавления.

Неполное оплавление покрытия по толщине имеет место при завышенных скоростях движения конвейера.

Неполное оплавление покрытия по поверхности ПП связано с неоднородностью покрытия по составу.

Потемнение диэлектрика, снижение сопротивления изоляции, термодеструкция диэлектрика, коробление ПП и расслаивание МПП вызваны длительностью воздействия высокой температуры на ПП, при этом может быть завышена как температура источника ИК излучения, так и занижена скоростью движения конвейера.

Таким образом, качество ИК оплавления зависит от качества гальванически осажденного покрытия (состава, толщины равномерности по толщине и по составу на поверхности и отверстиях ПП, плотности мелкозернистости осадка) и правильности выбора режимов ИК оплавления.

Основной проблемой, стоящей на операции ИК оплавления покрытия ОС, является повышение качества ПП. При решении этой проблемы необходим также учет требований, обусловленных особенностями производства. Операция ИК оплавления характеризуется: большой номенклатурой ПП, различных по толщине, площади металлизированной поверхности, материалам, имеющим различные тепловые и оптические характеристики; частым обновлением выпускаемой продукции; применением разных по конструкции установок ИК оплавления, различающихся: а) шириной зон предварительного и интенсивного нагрева; б) ИК излучателями, имеющими различные энергетические характеристики; в) расстоянием между излучателями и конвейером и между излучателями и, вследствие этого, различными законами распространения тепловых потоков; зависимос-

тью качества ИК оплавление от показателей качества гальванически осажденного покрытия ИС.

Эти особенности процесса ИК оплавления показывают необходимость расчета режимов оплавления для каждой партии ПП и конкретной установки ИК оплавления. Такой подход предполагает разработку методики расчета режимов ИК оплавления с учетом всех основных факторов, влияющих на качество и режимы ИК оплавления. Обзор литературных источников по вопросу влияния основных факторов на качество оплавления ПП показал, что эти сведения в литературе практически отсутствуют или имеют противоречивый характер.

В работе сделана попытка выделить основные факторы, влияющие на качество оплавления ПП и оценить степень и направленность их влияния.

При выборе основных были рассмотрены следующие факторы: состав покрытия ОС, толщина ПП, равномерность покрытия ОС по толщине и составу, плотность мелкозернистость покрытия, площадь металлизированной поверхности ПП, толщина покрытия ОС, теплопроводность, теплоемкость, коэффициенты отражения и поглощения, степень черноты стеклопластика, меди, ОС, ширина зон предварительного, интенсивного нагрева и зоны охлаждения.

Температура нагрева ПП, необходимая для оплавления покрытия ОС, зависит от его химического состава [4]. Для исключения перегрева диэлектрического материала ПП необходимо устанавливать минимальную температуру оплавления, которая зависит от напряжения, подаваемого на ИК излучателя, и скорости движения конвейера. Это возможно при нанесении на проводники ПП покрытия ОС с химическим составом, близким к эвтектическому, который плавится при температуре 183°C. Значительное отклонение состава покрытия ОС от эвтектического приведет к тому, что при этом минимальная температура, необходимая для качественного оплавления покрытия ОС, поднимается до 235-240°C, а это, в свою очередь, может привести к изменению цвета и термодеструкции диэлектрика, к получению меньше допустимого сопротивления изоляции, к потере диэлектриком конструктивных свойств, короблению ПП и расслоению МПП.

Для исследования были взяты составы покрытия ОС, содержащие 40, 50, 61 и 75 % Sn. Это объяснялось тем, что, во-первых

как показал анализ данных, собранных на разных предприятиях, отклонение состава покрытия ОС от эвтектического в производственных условиях находится в пределах 40-75 % Sn, во-вторых как показали исследования, проведенные нами, отклонение состава покрытия на поверхности одной печатной платы может составлять $\pm 25\%$ от эвтектического.

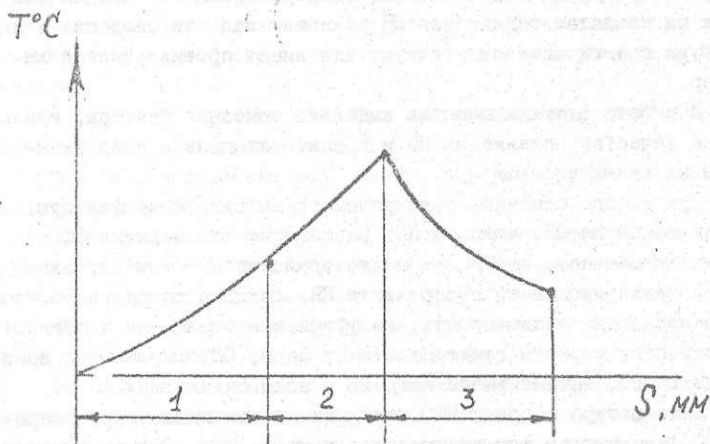


Рис. I. Тепловая схема процесса оплавления.
1-зона предварительного нагрева; 2-зона интенсивного нагрева; 3-зона охлаждения.

Толщина ПП составляла 1, 2 и 3 мм.

Измерение толщины покрытия ОС на поверхности ПП проводилось на установке "CompuDerm-B" США, представляющей собой прибор неразрушающего контроля для измерения состава и толщины различных покрытий, в том числе и ОС. Для определения толщины в приборе используются бета-частицы, отраженные от поверхности ПП. Эти частицы испускаются радиоактивным источником

T_N , находящимся в зонде. Точность измерения толщины составляет $\pm 1\%$.

Толщина покрытия ОС на проводниках и в отверстиях ПП,

как известно, должна быть 9 - 12 мкм. Неравномерность по толщине покрытия ОС приводит к тому, что реальная толщина покрытия ОС, как показали исследования, может находиться в пределах 6 - 30 мкм на поверхности ПП, а это в свою очередь может явиться причиной возникновения такого распространенного вида дефектов при оплавлении покрытия ОС, как появление неоплавленных участков, бугорков, неоднородности оплавленного покрытия. Поэтому для определения характера влияния толщины на режимы ИК оплавления значения толщины покрытия ОС были взяты на двух уровнях: 15 и 30 мкм.

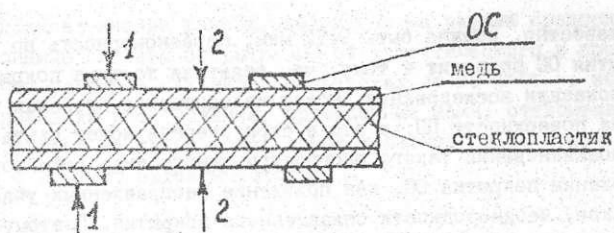
Применяемые в производстве ПП марки стеклопластика имеют различные теплофизические и оптические характеристики: теплопроводность, теплоемкость, коэффициента отражения и поглощения, степень черноты материала стеклопластика и др., которые оказывают различное влияние на формирование тепловых потоков в зонах нагрева и, таким образом, влияют на выбор тех или иных режимов ИК оплавления. Исследования по влиянию характеристик стеклопластика на режимы ИК оплавления до сих пор не проводились, и сведения по направленности этого влияния в литературе отсутствуют.

В качестве объекта исследования в данной работе взяты ДПП и МПП, изготовленные из материалов СТФ-2 и ВФТС, теплофизические и оптические характеристики которых известны. Известны также эти характеристики и для покрытия ОС и меди.

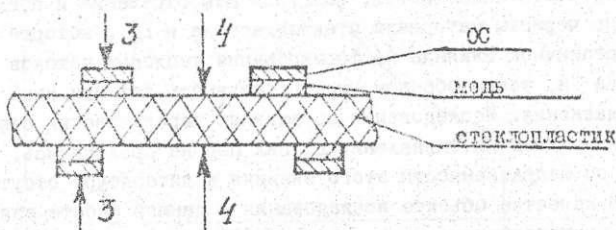
В работе [3] указывается на зависимость времени нагрева ПП от массы проводников, однако в литературе отсутствуют сведения о количественных зависимостях режимов ИК оплавления от площади металлизированной поверхности ПП.

Изучение влияния площади металлизированной поверхности ПП на режимы ИК оплавления проводилось следующим образом: рассматривались четыре случая прохождения ИК излучения через ПП (рис.2:

1) ИК излучение распространяется через слои ОС - медь - стеклопластик; этот случай имеет место, когда оплавление проводится до операции травления меди о пробельных мест, т.е. при наличии фольги; 2) ИК излучение проходит через слои медь - стеклопластик при тех же условиях, что и в предыдущем случае; 3) ИК излучение проходит через слои ОС - медь - стеклопластик; ИК оплавление проводится после операции травления, т.е. как в



а)



б)

Рис. 2. Распространение теплового потока через различные участки ПП: а) при оплавлении покрытия ОС на медном покрытии: 1 - ОС-медь-стеклопластик; 2 - медь-стеклопластик; б) при оплавлении покрытия ОС после травления меди с пробельных мест: 3 - ОС-медь-стеклопластик; 4 - стеклопластик

типовом ТП; 4) ИК излучение падает на стеклопластик, т.е. ИК излучение попадает на пробельные места ПП.

В данной работе предполагалось, что изменение площади металлизированной поверхности ПП есть ни что иное, как изменение толщины слоев покрытия ОС и меди. Такой подход к изучению влия-

определенном расстоянии (рис.3), позволяет получить вполне равномерные на большей своей площади поля излучения (рис.4).

Ширина зон интенсивного и предварительного нагрева установки ИК оплавления, используемой для проведения экспериментов, составляла 200 и 500 мм соответственно.

Температура источника ИК излучения или напряжение накала Ж излучателей была выбрана постоянной. Следует отметить не-

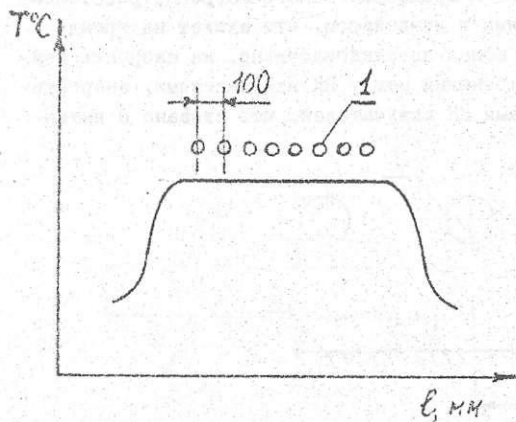


Рис.4. Продольное сечение поля излучения восьми ИК излучателей ИИ-1000, расположенных в ряд при расстоянии между осями 100 мм: 1 - ИК излучатель

целесообразность изменения напряжения накала ИК излучателей, так как производственных условиях, вследствие инерционности ИК излучателей, будут иметь место потери времени на их нагрев или охлаждение. Поэтому желательно стабилизировать напряжение и варьировать скоростью движения конвейера. В данной работе исследовалось влияние перечисленных выше факторов на скорость движения конвейера установки ИК оплавления при постоянной температуре источника ИК излучения.

Особенности влияния основных факторов на качество и режимы ИК оплавления ПП определялись методом математического моделирования на ЭВМ.

Как показали результаты экспериментов при изменении сос-

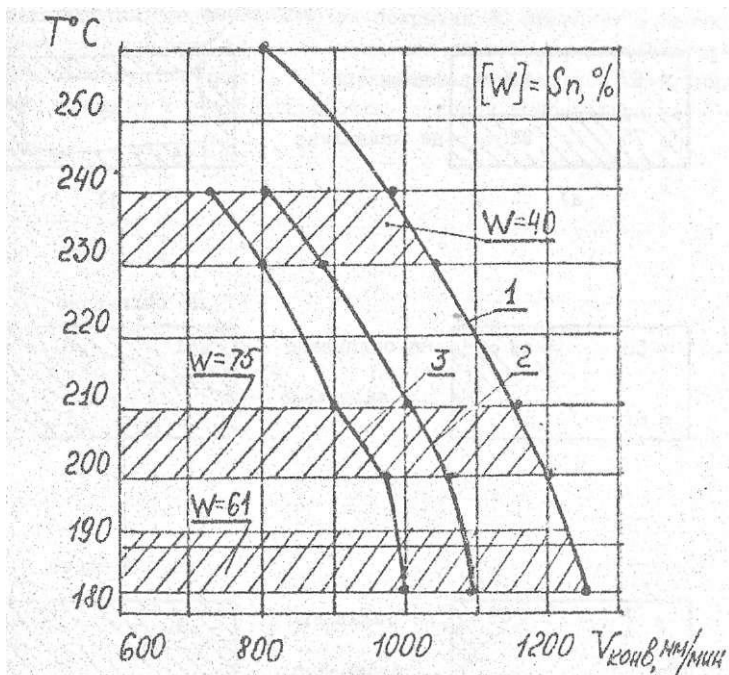


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности ПП на выходе из зоны интенсивного нагрева установки ИК оплавления $T^{\circ}\text{C}$ от скорости движения конвейера $V_{\text{конв}}$ при толщине покрытия ОС $h_{\text{р}} = 30$ мкм при толщине ПП l , мм: 1-0,5; 2-1,0; 3-1,5.

тава покрытия ОС в пределах от 40 до 75 % Sn скорость движения конвейера установки ИК оплавления должна быть изменена на следующую величину по сравнению со скоростью движения конвейера при эвтектическом составе покрытия ОС при толщине ПП, равной: 0,5 мм на 25%, 1 мм - на 15 %, 1,5 мм - на 12 %, 2 мм и 3 мм - на 10 % (рис.5). Поэтому наличие сведений о составе покрытия ОС перед началом расчета скорости движения конвейера является необходимым условием. Было установлено, что

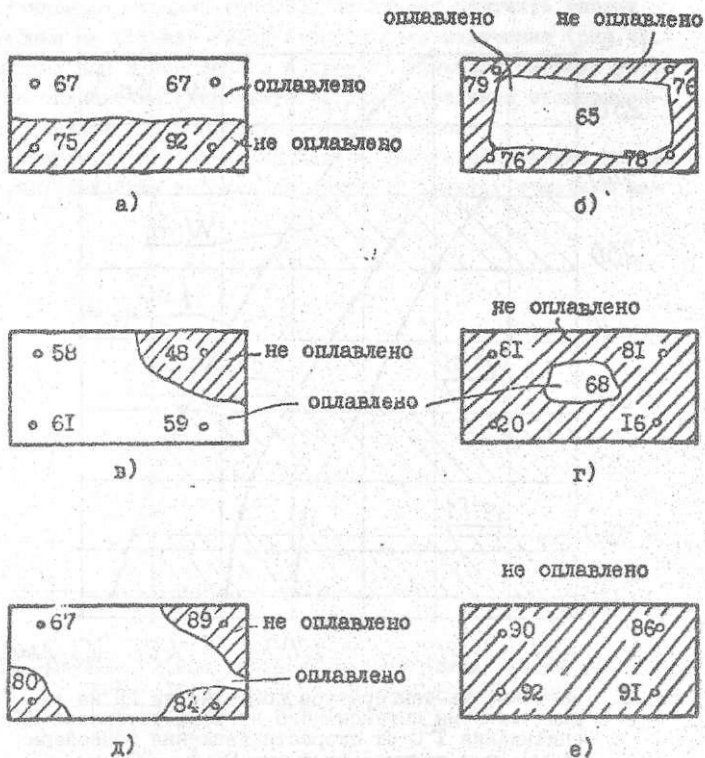
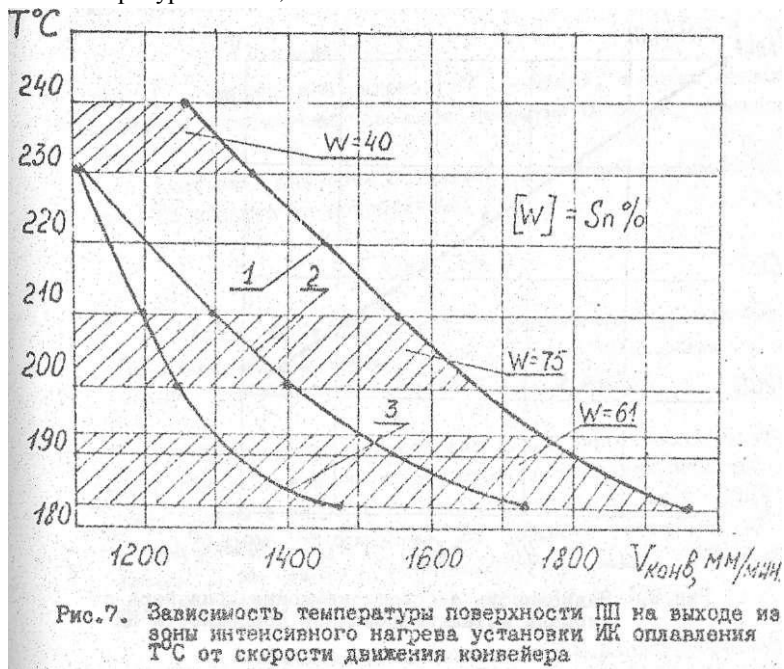


Рис. 6. Качество III после ИК оплавления покрытия ОС при оптимальных скоростях движения конвейера $V_{конв.}$, м/мин, для покрытия эвтектического состава при следующей толщине III h , мм, площади металлизированной поверхности % и указанном процентном содержании $U_{л}$ в покрытии, измеренном в пяти точках: а) $h=0,8$; $S=40$; $V_{конв.}=2,8$
 б) $h=1,4$; $S=60$; $V_{конв.}=1,55$
 в) $h=2,0$; $S=45$; $V_{конв.}=0,9$
 г) $h=1,75$; $S=35$; $V_{конв.}=1,0$
 д) $h=2,7$; $S=40$; $V_{конв.}=0,8$
 е) $h=2,7$; $S=40$; $V_{конв.}=0,9$

ИК оплавление, проведенное при скорости движения конвейера, обеспечивающей оплавление покрытия ОС эвтектического состава, привело к появлению неоплавленных участков в зонах, в которых состав покрытия отличался от эвтектического (рис.6).

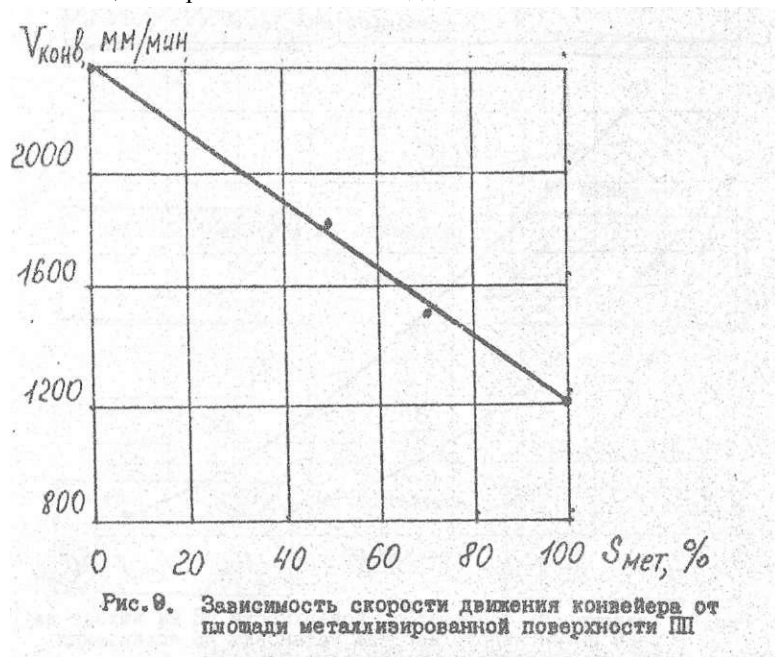
Неравномерность состава покрытия ОС приводит к необходимости назначать скорость движения конвейера, соответствующую составу покрытия ОС с наибольшей температурой плавления. Это приводит к воздействию более высокой температуры на ПП,



что может привести к ее перегреву.

В ходе исследования влияния толщины и равномерности по толщине покрытия ОС на режимы ИК оплавления установлено, что при уменьшении толщины покрытия в два раза, скорость движения конвейера должна быть увеличена для ПП толщиной 0,5 мм на 32 %, 1 мм - на 38 %. 1,5 мм - на 44 % (рис.7). Неравномерность по толщине покрытия ОС на поверхности ПП приводит к появлению неоплавленных участков в местах, где толщина покрытия ОС менее 7 мкм и заполнению монтажных отверстий в местах, где толщина более 20 мкм.

Установлено, что при изменении площади металлизированной поверхности ПП в пределах от 20 до 90 %, скорость движения конвейера должна быть изменена для ПП толщиной 0,5 мм на 60 % (рис.8). Это можно объяснить тем, что при изменении площади



металлизированной поверхности ПП из-за различных теплофизических и оптических характеристик покрытая ОС и стеклопластика изменяются величины потоков отражения и поглощения, а также тем, что при увеличении площади металлизированной поверхности, увеличивается масса покрытия ОС, расход тепла на оплавление которой также увеличивается. Это приводит к необходимости увеличения времени пребывания ПП в зоне интенсивного нагрева, где происходит ИК оплавление покрытия ОС, а это, в свою очередь - к уменьшению скорости движения конвейера.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что

наибольшее влияние на режимы ИК оплавления оказывает толщина ПП, толщина покрытия ОС, площадь металлизированной поверхности ПП, состав покрытия ОС. При этом необходимо указывать ширину зоны интенсивного и предварительного нагрева установки ИК оплавления, так как скорость движения конвейера

$$V_{\text{конвейера}} = f(S, \tau),$$

где S - ширина зон нагрева; τ - время, а также теплофизические и оптические свойства покрытия ОС меди и стеклопластика.

Учет этих факторов позволяет рассчитать оптимальные режимы ИК оплавления покрытия ОС.

Л и т е р а т у р а

1. Elliot D. *Solution and identification of problems Encountered during reflowing of tin/lead electrodeplate on circuits boards.* - *Insulation circuits*, 1973, v.I, N3, p.28-31.

2. Сляров И.К., Воробьева Л.А., Дорофеева А.И. Оплавление гальванического покрытия на проводниках печатных плат. Обмен опытом в радиопромышленности, вып. 12, с.11-13.

3. Javits M. *Directions for showing corrections of defects in the process of production of printers.* - *Insulation Circuits*, 1976, v.22, N4, p.5, 7-12, 15, 17-22, 24-30.

4. Изготовление печатных плат (Ю.М.Маслов, Г.А.Мясников, В.И.Непомнящий и др. - Обмен опытом в радиопромышленности, 1977, вып. 8, с. 18.

К.И.Билибин, Г.М.Пьянов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

Электронные модули первого уровня или электронные печатные узлы (ПУ) являются одним из основных конструктивных эле-

ментов электронно-вычислительных систем (ЭВС). Расширение производства ЭВС, вызванное массовой компьютеризацией различных сфер деятельности, в современных условиях возможно только на основе его автоматизации. На долю ПУ приходится около половины трудоемкости всех сборочно-монтажных работ в производстве ЭВС. В связи с этим, автоматизация сборочно-монтажного производства печатных узлов (СМП ПУ) является одной из наиболее актуальных в производстве ЭВС.

Основу любой производственной системы составляет организационно-технологическая структура. Она определяет особенности второй составляющей - системы планирования, подготовки и управления производством.

Основные принципы проектирования организационно-технологических структур автоматизированных производств, в том числе и гибких производственных систем (ГПС), в настоящее время достаточно хорошо разработаны [1] - [4]. Следует, однако, отметить, что подавляющее большинство работ ориентировано на механообрабатывавшее производство. Между тем, сборочно-монтажное производство печатных узлов имеет существенные отличия в части объекта производства, технологии, оборудования, типа и характера производства.

В большинстве работ признается, что проектирование такого сложного объекта, как автоматизированное производство, а также подготовка и управление им в ходе эксплуатации невозможны без использования моделирования. Однако, в настоящее время модели используются для решения отдельных задач, не увязаны друг с другом ни методически, ни информационно. Отсутствует также привязка к этапам проектирования производства. Отсутствует и взаимосвязь методов, моделей, используемых при проектировании производственной системы, и ее эксплуатации (конструкторско - технологическое проектирование, подготовка и управление производством). Это приводит, с одной стороны, к потере объективности проектных решений, увеличению трудоемкости и сроков проектирования, затрудняет организацию процесса проектирования производства. С другой стороны, отсутствие концептуального единства в моделях элементов производственной системы, используемых в различных сферах проектирования, подготовки и управления

производством является препятствием для их интеграции в составе интегрированной автоматизированной системы управления (ИАСУ) производства.

В большинстве работ предлагается использовать какой-либо один вид моделирования. Между тем, в силу определенных преимуществ и недостатков, присущих какому-либо виду моделирования: аналитическому, имитационному, натурному, на различных этапах проектирования, в зависимости от текущих целей, должны использоваться разные виды моделирования.

В настоящей работе процесс проектирования СМП ПУ предлагается решить на основе разработанной методики, учитывающей основные составляющие производственной системы: конструктивно- технологические особенности ПУ, организацию производства, оборудование, технологические процессы, подготовку и управление производством. Разработанная методика опирается на использование моделирующего комплекса. Используемые в основе моделей формализованные представления ПУ, оборудования, техпроцессов являются "сквозными", т.е. могут использоваться не только для проектирования СМП ПУ, но и как основа организации информационной базы ИАСУ СМП ПУ и автоматизации процессов проектирования, подготовки, управления СМП ПУ.

Организационно-технологическая структура сборочно-монтажного производства печатных узлов представляет собой совокупность технологического и транспортного оборудования, транспортно-технологической тары, складского оборудования, организованного определенным образом в производстве подразделения - цеха, участки, линии.

Разработка методов проектирования организационно-технологической структуры должна опираться на анализ ее особенностей для данного производства. Основными факторами определяющими особенности СМП ПУ являются следующие:

- характеристики материальных потоков: конструктивно-технологические особенности ПУ, номенклатура, программа выпуска, серийность, регулярность выпуска;
- организация СМП ПУ;
- технологические сборочно-монтажные процессы;
- характеристики используемого оборудования и тары.

Характерной особенностью СМП ПУ является большое количество материальных потоков различного типа и большая их интенсивность. Так номенклатура ПУ может насчитывать от десятков до тысяч в год, количество различных конструктивно-технологических типов элементов от десятков до сотен, а их номиналов - до десятков тысяч. Количество обрабатываемых элементов может быть от сотен до десятков тысяч в час.

Организация потоков в СМП ПУ обеспечивается с помощью комплектации, т.е. объединения в одной транспортно-технологической таре множества плат и (или) элементов. Существуют разные способы комплектации и разные виды тары. Комплектация обеспечивает упорядочение и синхронизацию потоков за счет комплектной подачи нужных элементов и плат на сборку, а также комплектного изготовления ПУ, автоматизацию сборочно-монтажных, манипуляционных и транспортно-складских операций, сокращение переналадок оборудования за счет объединения в комплектах плат и элементов по конструктивно-технологическому признаку (группирования).

К технологическим особенностям СМП ПУ, по сравнению, например, с механообработкой, следует отнести более высокую степень однородности техпроцессов (ТП), упорядоченность последовательности операций, а также наличие как обрабатываемых, так и сборочных операций. С другой стороны, большое разнообразие различных типов элементов привело к тому, что автоматическое сборочно-монтажное оборудование (а также тара), как правило, узко специализировано не только по операциям, но и по типам элементов, что затрудняет проектирование технологии, производства, выбор методов организации и управления им и вызывает необходимость автоматизации этого процесса. В качестве организационной основы СМП ПУ следует принять наиболее прогрессивную в настоящее время форму организации по замкнутому принципу, когда цеха и участки специализируются не по выполняемым операциям, а на обработке определенной номенклатуры, или конструктивно-технологических групп ПУ. Такая организация является основой построения ГПС и обеспечивает ряд преимуществ перед традиционной технологической формой организации производства [2].

Основные понятия и принципы, используемые для построения моделей производственных систем

Производственная система (ПС) состоит из двух частей

(подсистем): организационно-технологической и информационно-управляющей.

Первая часть является пассивной (объект управления), выполняющей изготовление изделий под управлением второй - активной части (субъект управления). Системный подход к проектированию ПС требует рассмотрения моделей этих двух частей в совокупности, на единой методической и концептуальной основе.

Предлагаемая в данной работе концептуальная основа построена на обобщении и развитии понятий, традиционно используемых в математическом моделировании различного рода систем, а также в проектировании и разработке информационно-управляющих систем и сетей. Целесообразность такого подхода можно обосновать следующим обстоятельством:

- эти понятия являются достаточно общими и удобными для их использования; на их основе можно проводить аналогии между организационно-технологическими (ОТС) и информационно-управляющими системами (ИУС) и, следовательно, взаимно использовать методы и модели для их проектирования, организации, управления;

- современное автоматизированное производство, в особенности, ГПС, характеризуется использованием ЭВМ на всех уровнях управления производством. В связи с этим, ОТС можно рассматривать как специфическое "Устройство" в составе ИУС на всех уровнях иерархии: модуль - участок (линия) - цех - предприятие. Следовательно, подход, основанный на использовании понятий, применяемых при исследовании ИУС, является не только возможным, но и необходимым.

Подход, основанный на аналогии между технологическими и управляющими системами используется, в частности, в [5], при исследовании систем управления ГПС.

Уровень детализации каждой из выделенных частей : ОТС и ИУС может быть разным, в зависимости от текущих целей. Так, в составе ИУС тоже можно выделить исполнительную часть - комплекс технических средств, являющийся средством обработки информационно-управляющих потоков и активную, управляющую часть - алгоритмы и программы. На некоторых этапах исследования аспекты, связанные с такой детализацией, например, время обработки

информационно-управляющих потоков, надежность технических средств и пр., могут не учитываться и не входить в состав модели. Однако, основная, активная часть ИУС - алгоритмы, правила функционирования, в том или ином виде, всегда должны быть представлены в модели ПС.

За основу построения моделей ПС примем ресурсный или сетевой подход. Модель системы представим в виде следующих компонентов:

- модели динамических, перемещающихся объектов (материальных и информационно-управляющих потоков) - объектов обработки в ПС:

- модели структуры системы, по которой движутся потоки и осуществляется их обработка- объекта управления;

- модели управления обработки потоков - субъекта управления.

Модель структуры является статическим объектом и состоит из следующих частей:

- структурных элементов системы - системных ресурсов, с помощью которых осуществляется обработка потоков;

- структурных связей между элементами системами - маршрутов обработки, задающих допустимые направления движения потоков при обработке.

Системные ресурсы можно представить в виде узлов сети (графа), а маршруты - в виде дуг, соединяющих узлы. Элементы потоков перемещаются между узлами сети по дугам сети, т.е. маршрутам обработки. В каждом узле осуществляется обработка элемента потока, или, иначе говоря, потребление или занятие системного ресурса. Выбор направлений движений потоков среди допустимых и управление процессом обработки осуществляется с помощью алгоритмов или правил, задаваемых моделью управления системой.

Будем различать два вида ресурсов, в зависимости от способа их использования:

- активные (процессоры);
- пассивные (память).

Процессоры осуществляют преобразования (обработку) элементов потоков. Реальными представителями таких ресурсов являются технологические и транспортные модули, процессоры ЭВМ, а также составные части (узлы, блоки), или наоборот, более крупные

структурные элементы: линии, участки, цеха и т.п., в зависимости от уровня детализации модели.

Памяти не осуществляют какого-либо преобразования или обработки элементов потоков, а выполняют функции их накопления. Реальными представителями таких ресурсов являются склады, накопители, различные виды групповой пары (кассеты, ленты и т.д.), а также устройства памяти ЭВМ.

Элементы потоков характеризуются маршрутами обработки, характеристиками потребления ресурсов, интенсивностью поступления в систему и другими характеристиками. Потребление активного ресурса (процессора) характеризуется временем обработки элемента потока, потребление памяти, кроме времени, характеризуется потребляемой емкостью памяти. По характеристикам потоков могут быть выделены группы, типы потоков. При этом могут быть выделены специальные типы потоков, например, отказы и восстановление ресурсов. "Занятие" отказом ресурса означает выход его из строя, а занятие восстановлением - восстановление его работоспособности. Время "занятия" ресурса отказом соответствует времени восстановления его работоспособности.

В реальных системах ресурсы, как правило, специализированы по выполняемым операциям обработки и типам обрабатываемых потоков, поэтому можно говорить о различных типах ресурсов. Каждый системный ресурс определенного типа может иметь ряд характеристик: производительность (процессоры), емкость (памяти), надежность характеристики и т.п.

Структурные элементы системы, потоков, а также процессы их обработки могут рассматриваться с разной степенью детализации. В табл.1 приведены различные уровни детализации для модели организационно-технологической структуры СМП ПУ.

Каждый системный ресурс (процессор) на различных уровнях Представления обладает соответствующими характеристиками, в частности, производительностью.

На каждом уровне детализации модели систем можно рассматривать с разной степенью абстракции, в зависимости от текущих целей. Уровни абстракции отражают текущие представления о системе на разных этапах: проектирования, планирования и управления обработкой. Они дают возможность избавиться от необходимости знать подробно характеристики потоков, структуру реальной

Таблица 1

Уровни детализации для модели структуры СМП ПУ

Уровень детализации	Структурный элемент системы (процессор, ресурс)	Элемент потока
предприятие	цех	цеховые комплексы ПУ
цех	участок	участковые комплексы ПУ
участок	технологические модули	группкомплекты
модули	узлы, блоки	платы, элементы

системы и ее состояние в момент, когда будет непосредственно производиться обработка потоков. Такой подход широко используется при проектировании вычислительных систем и управлении их ресурсами. При этом используются такие понятия как "виртуальная" и реальная машина или устройство, логические и физические устройства и т.п. Аналогичный подход использован при проектировании ГПС механообработки [1].

Выделим три уровня абстракции представления системы: виртуальный, логический, физический.

Виртуальный уровень используется как исходное представление о системе при ее проектировании, при проектировании маршрутов обработки потоков. На этом этапе информация в системе не учитывается, поэтому она представляется в виде виртуальной (воображаемой) структуры виртуальных ресурсов. Процесс обработки представляется в виде виртуальных операций, на виртуальных процессорах, по виртуальному маршруту.

В процессе логического проектирования производится уточнение процесса обработки на основе информации о типах потоков и типах ресурсов системы. Однако при этом, полученная логическая структура является статической и не учитывает динамику функционирования системы - нагрузку на систему (интенсивности потоков), производительность системы, и, следовательно, их количество (мощность), а также текущее состояние системы. Результатом проектирования на логическом уровне является статическая (логическая) схема обработки, в виде маршрута, где указываются только типы требуемых ресурсов и последовательность их использования.

На следующем этапе - физического проектирования логическая структура системы дополняется информацией о нагрузке на систему (интенсивности потоков), о производительности ресурсов, их количестве и состоянии системы и ее элементов. В результате получается динамическая модель, отражающая реальную (физическую) структуру системы и ее функционирование. Логические маршруты обработки уточняются до реальных, с указанием не только типа, но и конкретного, реального ресурса.

Таким образом, такая трехуровневая концепция проектирования, основана на последовательном уточнении структуры системы.

Эта концепция может быть использована не только для проектирования новых систем, но и для эксплуатации существующих. Отличие заключается в том, что при этом логическая и физическая структуры системы зафиксированы, а целью исследования является определение логических маршрутов обработки для новых типов потоков или планирования физических маршрутов и управления их обработкой.

Иными словами, на виртуальном уровне определяется " что надо сделать (произвести)?", на логическом - "как это сделать?" (типы ресурсов, потоков, маршруты обработки), на физическом - "на чем сделать и в каком количестве?".

Различные аспекты исследования систем на разных уровнях абстракции требуют использования различных типов моделей. На логическом уровне используются статические (логические, информационные) модели, на физическом уровне - динамические модели функционирования (модели производительности), которые, как правило, носят вероятностный характер.

Применительно к технологическим системам описанные уровни абстракции можно представить, как исходное (конструкторское) представление для виртуального уровня, технологическое проектирование для логического уровня, проектирование реальной новой системы или планирование и управление обработкой для существующей системы для физического уровня.

На виртуальном и логическом уровне организационно-технологическую структуру участков СМП ПУ можно отобразить в виде графа матричной структуры, пример которой приведен на рис.1. По горизонтали графа отображаются операции, по вертикали - типы

потоков, на их пересечении - вершины (процессоры обработки).

На физическом уровне граф становится объемным, т.к. учитывается количество процессоров каждого типа.

Проектирование организационно-технологической структуры СМП ПУ

Как уже отмечалось, общие принципы проектирования автоматизированных производств достаточно хорошо разработаны и опробованы на практике.

В соответствии с этими принципами, весь процесс проектирования можно разделить на следующие этапы (рис.2):

- анализ выпускаемой и предполагаемой к выпуску продукции;
- проектирование организационно-технологической структуры производства на детальном уровне (технический и рабочий проект)
- проектирование ИАСУ производства.

Такая последовательность этапов соответствует причинно-следственной цепочке: объект производства - структура производства - система подготовки и управления производством. Процесс в целом может носить итеративный характер, в зависимости от степени соответствия спроектированной системы поставленным целям.

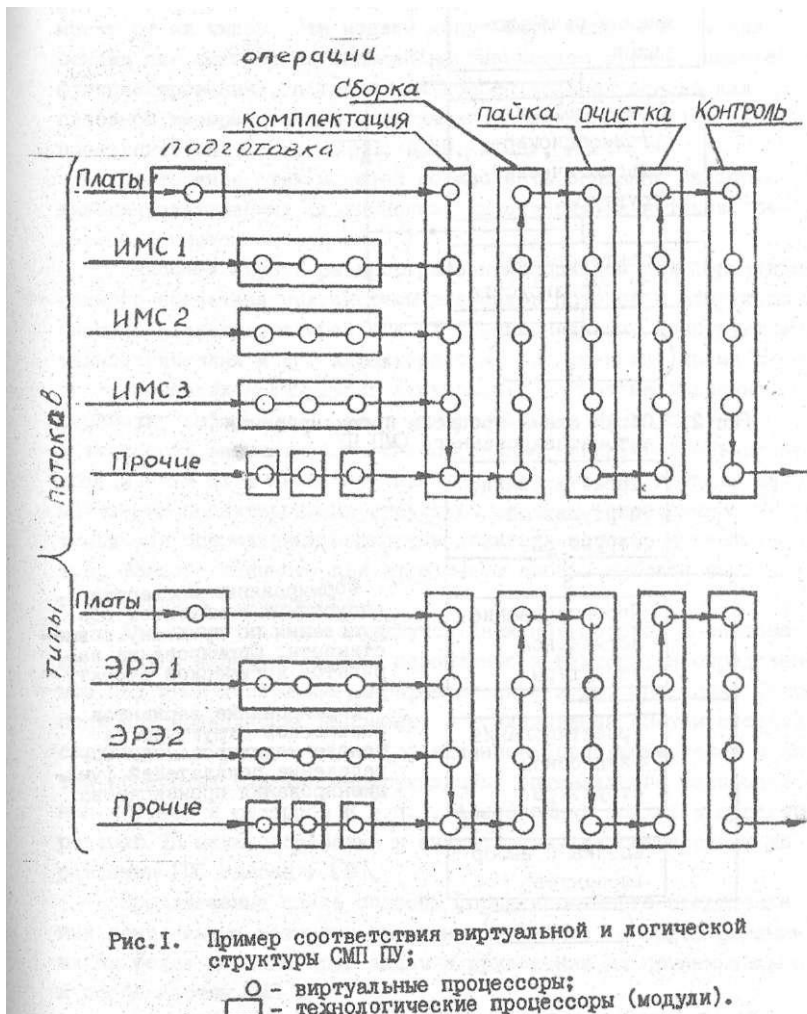
Определяющей компонентной производственной системы является ее организационно-технологическая структура.

Рассмотрим процесс проектирования организационно-технологической структуры СМП ПУ, на основе моделирования, основываясь на описанных выше методах организации производства и принципах построения моделей (рис.3).

В соответствии с этим, процесс проектирования будем вести методом последовательного уточнения, используя разные уровни абстракции (представления) - виртуальный, логический и физический, а также разную степень детализации структуры системы и ее функционирования.

Модели систем на виртуальном и логическом уровнях представления

На виртуальном и логическом уровне целью исследования яв-



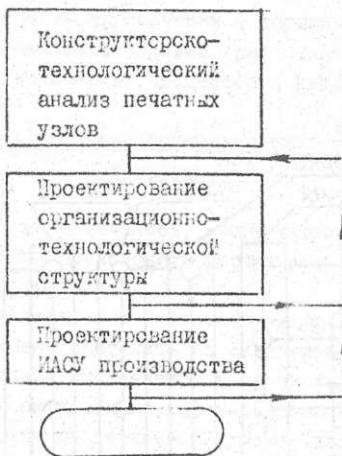
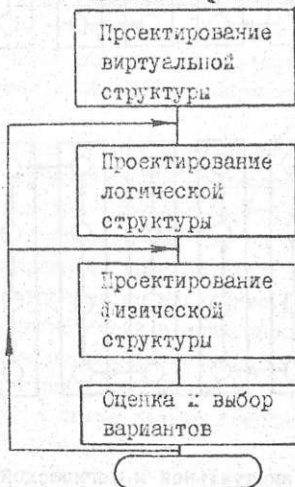


Рис. 2. Общая схема процесса проектирования автоматизированного СМП ПУ



Формирование множества допустимых комплектов оборудования по признаку совместимости. Формирование вариантов логической структуры.

Формирование вариантов физической структуры на основе моделирования. Определение показателей функционирования производства.

Рис. 3. Этапы проектирования организационно-технологической структуры

ляется определение структуры системы с точностью до типов ресурсов и потоков, маршрутов обработки потоков, в зависимости от их типов. Эти модели могут быть использованы как основа для построения моделей на физическом уровне (моделей функционирования), а также как концептуальная основа для сквозной информационной интеграции различных подсистем ИАСУ производством: САПР, АСТПП, АСУП, АСОДУ, АСУТП.

Построение этих моделей должно быть основано на формализации статических (логических) характеристик потоков, ресурсов и системных связей.

Наиболее широко распространенным подходом для формализованного представления системы элементов потоков и структуры системы является кодирование их функциональных, конструктивно- технологических и др. характеристик. Кодирование, кроме чисто технических преимуществ (сокращение затрат на хранение и обработку информации), дает принципиальные преимущества - возможность автоматизации классификации кодируемых объектов, объединения их в конструктивно-технологические группы, автоматизации проектирования структуры системы, определение допустимых или оптимальных маршрутов движения потоков в системе и т.п. Большое значение при этом имеет выбор наиболее подходящего способа кодирования.

Для представления маршрутов движения потоков в системе широко используются булевы переменные и вектора, и определенные над ними логические, арифметические и др. операции. Такой подход используется, например, в исследовании систем сетевой структуры, в частности, информационно-управляющих сетей и систем обработки (задачи маршрутизации, оптимального распределения потоков и ресурсов и т.п.). Аналогичный подход к проектированию ТП механообработки и ситуативному диспетчерскому управлению ГПС описан в [9].

Предлагаемые здесь способы формализованного представления основаны на развитии известных подходов, распространении их на более широкий круг задач и приложении их применительно к особенностям СМП ПУ.

Формализованное представление материальных потоков

Рассмотрим формализованные представления элементов ма-

териальных потоков СМП ПУ на виртуальном и логическом уровнях.

В соответствии с описанными выше принципами построения моделей, каждый элемент потока, с точки зрения маршрутов обработки, которые являются целью исследования системы на этих уровнях, характеризуется своими собственными характеристиками, и типами операций по их обработке.

Характеристиками элементов материальных потоков, которые определяют маршруты обработки, являются их функциональные и конструктивно-технологические характеристики.

Формализованное представление этих характеристик потоков в СМП ПУ можно осуществить на основе кодирования функциональных и конструктивно-технологических характеристик печатных узлов плат, комплектующих элементов.

Будем полагать, что каждый комплектующий элемент, используемый в СМП ПУ, имеет уникальный цифровой код (в порядке возрастания), соответствующий его функциональным параметрам - номиналу элемента).

Аналогичный код можно присвоить плате, входящей в состав ПУ, а также самому ПУ.

Тогда состав i -го ПУ можно представить в виде вектора функциональных характеристик элементов:

$$C_i^H = (N_{i1}^H, N_{i2}^H, \dots, N_{iN_H}^H),$$

где N_{ij}^H - количество элементов с j -ой функциональной характеристикой (номиналом) в составе ПУ;

N_H - количество различных номиналов элементов, используемых в данном производстве.

Аналогично можно представить и конструктивно-технологические особенности печатных узлов, плат, элементов. Будем полагать, что все элементы классифицированы по конструктивно-технологическим особенностям их корпусов, количеству и форме выводов, технологии монтажа, установочным размерам и т.п., и имеют соответствующие цифровые конструктивно-технологические коды этих характеристик. Аналогично можно представить конструктивно-технологические характеристики плат: технологию изготовления, монтажа элементов, типоразмер платы и т.п.

Тогда конструктивно-технологические особенности элементного состава ПУ можно описывать векторами:

$$C_i^T = (N_{i1}^T, N_{i2}^T, \dots, N_{iM}^T),$$

где N_{ij}^T - количество элементов j -го конструктивно-технологического типа в составе ПУ;
 N^T - количество различных конструктивно-технологических типов элементов.

Введем также вектора - индикаторы состава ПУ:

$$\Pi_i^H = (n_{i1}^H, n_{i2}^H, \dots, n_{iM}^H),$$

$$\tilde{\Pi}_i^H = (\tilde{n}_{i1}^H, \tilde{n}_{i2}^H, \dots, \tilde{n}_{iM}^H),$$

где $n_{ij}^H = \begin{cases} 1, & \text{если соответствующая компонента } N_{ij}^H > 0 \\ 0, & \text{если } N_{ij}^H = 0 \end{cases}$
 \tilde{n}_{ij}^H определяется аналогично.

Такого типа вектора можно ввести и для описания элементов потоков более высокого уровня-комплектов ПУ. При этом соответствующие векторы будут вычисляться на основе арифметических и логических операций сложения над векторами входящих в состав данного комплекта ПУ:

$$\Pi_i^{*K} = \Pi_{i1}^{*K+1} \vee \Pi_{i2}^{*K+1} \vee \dots \vee \Pi_{iN_*^{*K+1}}^{*K+1},$$

где Π_i^{*K} - вектор-индикатор состава i -го комплекта;
 Π_{ij}^{*K} - вектора-индикаторы ПУ, входящих в состав данного комплекта;
 K - номер уровня (порядок) комплекта;
 N_*^{*K} - количество ПУ в комплекте;
 $=H$ или T ;
 $C_i^{*K} = \sum_j C_{ij}^{*K}$ - вектор элементного состава комплекта.

Для формализованного описания маршрутов обработки элементов потоков, кроме характеристик самих элементов, необходимо описать состав и последовательность операций по обработке.

В моделях организационно-технологической части СМП ПУ это может быть описано следующим образом.

На каждом уровне детализации системы: предприятие: цех, участок, модуль, описываются состав и последовательность операций применительно к элементу потока данного уровня.

На уровне участка этим описаниям соответствует описание выполняемых операций отдельными модулями (маршрутный ТП); на

уровне цеха операции, выполняемые участками, могут быть описаны укрупненно, путем указания типов используемых ТП.

На исходном, виртуальном уровне представления, используются виртуальные представления операций.

Описание виртуальных операций для некоторого ПУ можно представить в виде вектора-индикатора виртуального ТП:

$$O_i = (O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iN_o})$$

где $O_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если для изготовления } j\text{-го ПУ должна быть выполнена на } i\text{-й виртуальной операции;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$
 N_o - количество виртуальных операций.

Описание виртуальных операций для структурных элементов потока более высокого уровня (группкомплект, участковые и цеховые комплекты) может быть вычислено путем логического сложения векторов-индикаторов операций, входящих в состав элементов более низкого уровня.

$$O_i^k = O_{i1}^{k+1} \vee O_{i2}^{k+1} \vee \dots$$

где k - уровень (порядок) комплекта;
 i - номер комплекта;
 O_{ij}^{k+1} - вектора-индикаторы состава операций элементов более низкого уровня, входящих в данный.

Введение описания характеристик элементов потоков и типов виртуальных операций по их обработке в совокупности образуют тип элемента потока, который можно представить в виде совокупности соответствующих векторов-индикатором:

$$\Pi_i = (\Pi_{ni}, O_{ni})$$

где Π_{ni} - вектор-индикатор характеристик i -го элемента потока;
 O_{ni} - вектор-индикатор виртуальных операций для его обработки.

При анализе модулей на верхних уровнях детализации, где происходит укрупнение как потоков, так и элементов структуры, целесообразно проводить и укрупнение типов потоков, и, соответственно, векторов-индикаторов типов. Это может быть сделано на основе группирования элементов потоков нижнего уровня, имею-

ших сходные типы (характеристики и маршруты обработки) в более крупные группы и присвоении им типа верхнего уровня.

В технологических системах это соответствует группированию объектов обработки по конструктивно-технологическим, организационно-технологическим признакам и технологическим процессам в группы или комплекты.

Таким образом, вектора-индикаторы элементов потоков в моделях на уровне цеха и предприятия, т.е. участков и цеховых комплектов будут иметь вектора-индикаторы, выраженные не в типах (номенклатуре) комплектующих элементов и операций ТП, а в типах ПУ и типах ТО.

Формализованное описание структуры элементов (ресурсов) системы

В соответствии с определенными выше принципами, на уровне виртуальных и логических представлений, каждый ресурс системы характеризуется своим типом. Тип ресурса определяет его специализацию по типам обрабатываемых потоков, описанных выше, и может быть представлен по аналогии с типом потока, в виде совокупности векторов-индикаторов:

$$P_{\ell} = (P_{\ell j}, O_{\ell k})$$

где $P_{\ell j}$ - вектор-индикатор типов потоков, которые могут обрабатываться с использованием данного ресурса;

$O_{\ell k}$ - вектор-индикатор выполняемых операций обработки.

Вектора-индикаторы $P_{\ell j}$ и $O_{\ell k}$ формируются аналогично векторам-индикаторам типа потока $P_{\ell i}$ и $O_{\ell i}$:

$$P_{\ell j} = (p_{\ell j_1}, p_{\ell j_2}, \dots, p_{\ell j_N}),$$

где $p_{\ell j} = \begin{cases} 1, & \text{если на ресурсе } \ell \text{ го типа может быть обра-} \\ & \text{тан элемент с характеристикой } j \text{ типа,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

$$O_{\ell k} = (o_{\ell k_1}, o_{\ell k_2}, \dots, o_{\ell k_N}),$$

где $o_{\ell k} = \begin{cases} 1, & \text{если на ресурсе } \ell \text{ го типа может быть вы-} \\ & \text{полнена виртуальная операция } k \text{-го типа} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

При рассмотрении структурных элементов системы на разных - уровнях детализации, уровень специализации, и, следовательно, тип элементов более высокого уровня можно вычислить на основе логических операций над типами входящих в него элементов более низкого уровня:

$$\begin{aligned} \Pi_{PE}^K &= \Pi_{PE_1}^{K+1} \vee \Pi_{PE_2}^{K+1} \vee \dots \\ O_{PE}^K &= O_{PE_1}^{K+1} \vee O_{PE_2}^{K+1} \vee \dots \end{aligned}$$

где Π_{PE}^{K+1} - векторы-индикаторы специализации ресурсов уровня (K+1), входящих в состав ресурса уровня K.

Так, специализация участка определяется по специализации входящих в его состав технологических модулей (рабочих мест). Специализация модулей (рабочих мест) может быть определена векторами-индикаторами, отражающими типы обрабатываемых комплектующих элементов, плат, и выполняемые технологические операции, поэтому они формируются аналогично векторам-индикаторам ПУ, описанным выше.

Для удобства построения и анализа моделей на верхних уровнях (цех, предприятие) специализация элементов их структуры (участок, цех), может быть выражена в более укрупненном виде, аналогично описанному выше укреплению потоков путем сопоставления типам (номенклатуре) элементов, обрабатываемых на них, определенного типа ПУ, а типам операций-определенного типа техпроцесса.

Таким образом, вектора-индикаторы участков и цехов в моделях, соответственно, уровня цеха и предприятия, будут состояться не на основе типов (номенклатуры) элементов, плат и операций ТП, а на основе типов ПУ и типов соответствующих ТП.

Организационная структура системы, т.е. вхождение ресурсов в ресурсы более высокого уровня, может быть описана совокупностью векторo-индикаторов состава ресурсов. Вектор-индикатор состава ресурса некоторого уровня может отражать входящие в данный ресурс ресурсы

$$S_i^K = (S_{i_1}^{K+1}, S_{i_2}^{K+1}, \dots, S_{i_{N^{K+1}}}^{K+1}),$$

где S_i^K - вектор-индикатор состава i-го ресурса уровня K,

⊕ - операция свертки компонент вектора по логическому сложению:

$$\oplus X = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n$$

Типы используемых ресурсов на отдельной, К виртуальной операции, можно вычислить с помощью векторов-индикаторов:

$$M_i^k = (m_{i1}^k, m_{i2}^k, \dots, m_{iK}^k),$$

где $m_{i\ell}^k = \begin{cases} 1, & \text{если на } k \text{ ой операции } i \text{ й элемент} \\ & \text{потока должен обрабатываться на ресурсе} \\ & \ell \text{ го типа,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

$$m_{i\ell}^k = O_{\ell k} \cdot m_{i\ell}$$

Тогда весь маршрут обработки для $i^{\text{го}}$ элемента потока, с учетом последовательности операций, определится совокупностью векторов:

$$TM_i = \{M_i^1, M_i^2, \dots, M_i^k\}$$

, которую можно представить

в виде матрицы маршрутов, где столбцы указывают операции, а строки - типы ресурсов:

$$TM_i = \{tm_{i\ell k}\}$$

где $tm_{i\ell k} = m_{i\ell}^k = O_{\ell k} \cdot m_{i\ell}$.

Графически маршруты потоков изображаются с помощью графа структуры системы, пример которой приведен на рис. 1. Элемент матрицы маршрутов $tm_{i\ell k} = 1$, если соответствующая вершина графа используется при обработке данного элемента потока.

Маршруты обработки рассматриваются соответственно уровню детализации модели. Так, на уровне участка этот маршрут соответствует маршрутному ТП для групп-комплекта, на уровне цеха - это участок, на котором обрабатывается соответствующий элемент потока (участковый комплект).

Проектирование организационно-технологической структуры на виртуальном уровне

Исходным уровнем проектирования является виртуальный.

Главкой задачей этого уровня является анализ конструктивно-технологических особенностей выпускаемых (предполагаемых к выпуску) ПУ, номенклатуры ПУ, объемов выпуска, регулярности (повторяемости) в течение определенного периода времени. Результатом такого анализа является предварительное (виртуальное) разбиение всей номенклатуры ПУ на конструктивно-технологические группы, однородные по конструктивно-технологическим типам плат, элементов и сборочно-монтажным операциям. Основу этого должна составлять конструкторско-технологическая классификация плат и элементов.

Выделенные группы определяют виртуально технологическую структуру производства (рис.1): виртуальные типы потоков, виртуальные технологические модули (процессоры) для их обработки и виртуальные маршруты обработки. При группировании ПУ, а также виртуальных операций следует исходить из самой высокой степени специализации известных типов сборочно-монтажного оборудования по типам элементов и выполняемых операций.

Второй задачей этого этапа является определение интенсивности выделенных типов потоков, общего потока и доли каждого типа потока в общем потоке на основе количественного состава ПУ, объемов и регулярности их выпуска, которые будут использованы впоследствии при физическом проектировании системы.

Большое разнообразие номенклатуры и состава ПУ по типам и номенклатуре и количествам элементов, неравномерное распределение их выпуска в течение плановых периодов времени, позволяют трактовать количественные характеристики потоков (интенсивности типов потоков, распределение типов потоков) только в вероятностном смысле. Отсюда возникает необходимость получения этих характеристик на основе статической обработки. Такая обработка, в связи с большой ее трудоемкостью, может быть проведена только автоматизированным способом. Автоматизация необходима также и для решения первой задачи - выделения групп (типов) потоков, поскольку в условиях большой номенклатуры и разнообразия этих потоков сделать это "вручную", на основе типовых представителей является затруднительным, поскольку трудно выбрать сам типовой представитель и оценить, насколько он является представительным.

Для решения указанных задач была разработана автоматизи-

рованная система конструкторско-технологического анализа (АСКТА) ПУ. АСКТА обеспечивает автоматизированную обработку конструктивно-технологических, а также количественных характеристик ПУ по методике, описанной выше.

Входными данными для ее работы являются следующие:

- данные с описанием состава ПУ;
- база данных конструктивно-технологических характеристик используемых элементов;
- данные о номенклатуре и объемах выпуска ПУ;

Входные данные могут быть взяты в готовом виде из соответствующих систем: САПР, АСТПП, АСУП, либо созданы внутри системы. Выходные данные, получаемые в результате работы системы, можно разбить на следующие группы:

- статистика по конструктивно-технологическим характеристикам плат и элементов в составе ПУ;
- статистика по однородности и разнородности элементного состава;
- составы выделенных групп ПУ;
- статистика, характеризующая долю выделенных групп ПУ в общем потоке.

При этом статистика по характеристикам плат, элементов, однородности и разнородности элементного состава может вычисляться по отдельным ПУ, по группам ПУ, по всему множеству ПУ. В качестве характеристик могут задаваться любые конструктивно-технологические характеристики плат и элементов, выделенные на этапе конструкторско-технологической классификаций и определенные в базе данных, в том числе и такие, как типы транспортно-технологической и складской тары. Это позволяет использовать АСКТА и для решения таких задач, как определение требований к автоматизированному складу комплектующих, определение типов, количества и емкости носителей для обработки комплектов ПУ в производстве.

Результаты работы АСКТА формируются в виде файлов данных, которые используются на последующих этапах проектирования, а также в виде статических таблиц, характеристик распределений, гистограмм.

Укрупненная схема работы АСКТА приведена на рис.4.

Автоматизация группирования ПУ может быть осуществлена

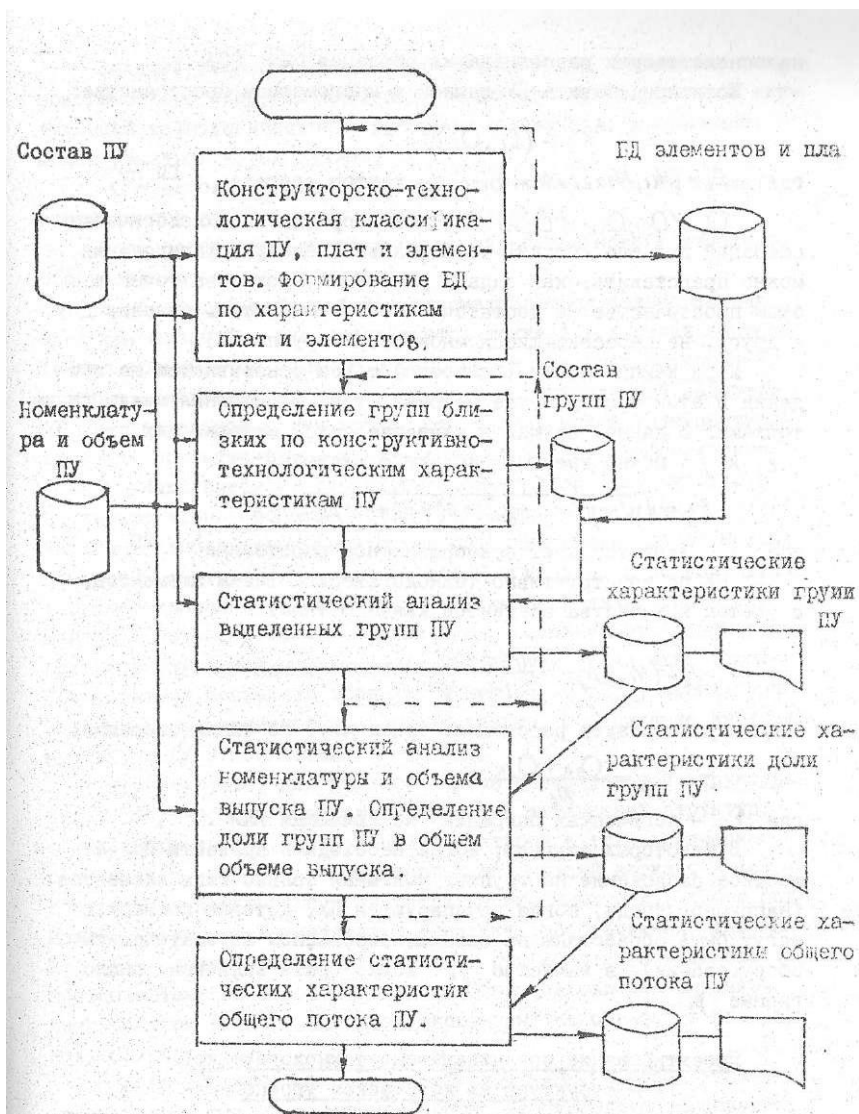


Рис. 4. Схема автоматизированного статистического анализа печатных узлов (ПУ)

на основе теории распознавания образов [2], [6].

Если представить ПУ точкой в многомерном пространстве:

$$X_i = (C_i, O_i),$$

где (C_i, O_i) - вектор состава $i^{\text{го}}$ ПУ,

$O_i = (O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iN_o})$ - вектор типов технологических операций для его сборки, то формально задачу группирования можно представить, как задачу разбиения множества точек в этом пространстве на достаточно компактные, т.е. близкие друг к другу, не пересекающиеся множества (группы ПУ).

Мера компактности (близости) точек основывается на введении в этом пространстве метрики, т.е. расстояния между двумя точками. В данном случае в качестве такой метрики для двух ПУ: i и j можно ввести следующую величину:

$$R_{ij} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \dots + \gamma_{N_T}^2 + \beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_{N_o}^2},$$

где γ_k характеризуют покоординатное расстояние $i^{\text{го}}$ и $j^{\text{го}}$ ПУ по конструктивно-технологическим типам элементов, с учетом количества элементов каждого типа:

$$\gamma_k = (N_{ik} - N_{jk}) \cdot \frac{(N_{ik} + N_{jk})}{\sum_{e=1}^{N_k} (N_{ie} + N_{je})}, \text{ где}$$

β_k характеризует расстояние (различие) по типам операций:

$$\beta_k = \frac{O_{ik} \uparrow O_{jk}}{N_o},$$

где \uparrow - логическая операция "исключающая ИЛИ".

В некоторых случаях, когда необходимо провести более жесткое разделение на группы, учитывая только типы элементов (например, тогда, когда группируются ПУ, которые полностью могут быть обработаны на специализированном автоматическом оборудовании), в качестве γ_k можно брать величины, аналогичные β_k

Проектирование организационно-технологической структуры на логическом уровне

После определения виртуальной структуры производства начинается этап его проектирования на логическом (технологическом) уровне.

Задачей этого этапа является определение комплектов технологического оборудования, подходящих для сформированной виртуальной технологической структуры. Эта задача, в принципе, может решаться двумя путями:

- на основе анализа и выбора этих комплектов из существующих типов оборудования (задача анализа);
- на основе проектирования и разработки нового комплекта оборудования (задача синтеза);

В настоящей работе будет рассматриваться только задача анализа, поскольку она используется также и в задачах синтеза (когда принимается решение о разработке нового оборудования, и когда анализируется его соответствие поставленной задаче).

С формальной точки зрения эту задачу можно интерпретировать как покрытие графа виртуальной структуры графом логической (технологической) структуры производства (см. рис.1). В результате этого процесса может произойти "свертывание" (стягивание) вершин виртуального графа по горизонтали (за счет концентрации виртуальных операций в одном модуле) и по вертикали (за счет возможности обработки модулем нескольких типов элементов). Возможно также объединение нескольких отдельных подграфов виртуальной структуры, в том случае, если один комплект оборудования позволяет обработать несколько виртуальных групп ПУ. При этом, происходит, соответственно, объединение виртуальных групп ПУ в логические.

В результате, для каждого варианта виртуальной структуры будет сформировано множество вариантов логических структур, совместимых с этой виртуальной структурой в технологическом смысле, т.е. полностью покрывающих ее; каждый вариант может состоять из некоторого количества несвязанных между собой подграфов, которые соответствуют комплекту оборудования, выбранного для соответствующей группы ПУ. Эти комплекты являются претендентами на базовый комплект оборудования для организации участков (линий), специализированных на обработке соответствующих групп ПУ.

Таким образом, основной проблемой данного этапа является отбор подходящих комплектов сборочно-монтажного оборудования. В настоящее время количество различных типов и модулей сборочно-монтажного оборудования достаточно велико. Однако, количество "сквозных" комплектов, охватывающих все технологические

операции, значительно ниже, поскольку при этом требуется технологическая совместимость (по типам обрабатываемых плат и элементов, технологии монтажа, транспортно-технологической таре и т.п.), а также совместимость информационно-управляющая (по информационному и программно-аппаратному обеспечению локальных и групповых систем управления), средствам транспортировки, комплектации, складирования и т.п.

Например, количество таких комплектов для сборки и монтажа ПУ с планарными ИМС составляет около 1 десятка. Кроме того, исходное множество комплектов значительно сокращается при анализе и учете таких факторов, как доступность оборудования, обеспечение необходимой точности плат и элементов в случае автоматической сборки, надежность работы, стоимость, совместимость с действующим производством по оборудованию, таре, информационно-управляющей части и т.п. Сокращение количества вариантов может обеспечить также использование рекомендаций по выбору типовых комплектов оборудования в зависимости от типа и характера производства конструктивно-технологических особенностей, выпускаемых ПУ.

Полная автоматизация процесса выбора оборудования невозможна, в связи с неформализуемыми факторами, перечисленными выше. Однако, возможна частичная автоматизация (поиск и отбор в диалоговом режиме) на основе формализованного представления типов оборудования описанных выше.

В этом случае должна иметься в наличии проектная база данных по оборудованию, которая содержит описание совместимых между собой комплектов оборудования, в том числе и типы оборудования в виде векторов-индикаторов типов выполняемых операций и типов обрабатываемых элементов и плат. Схема автоматизированного отбора комплектов оборудования в этом случае приведена на рис.5.

На основе типов сформированных виртуальных групп осуществляется автоматизированный поиск и предварительный отбор из базы данных комплектов оборудования, подходящих для данной группы. При этом должно выполняться условие совместимости по операциям и типам элементов, плат:

$$\bigwedge (P_i \Rightarrow P_e), \quad \text{или} \quad [\bigwedge (P_{n_i} \Rightarrow P_{re})] \wedge [\bigwedge (O_{n_i} \Rightarrow O_{re})],$$

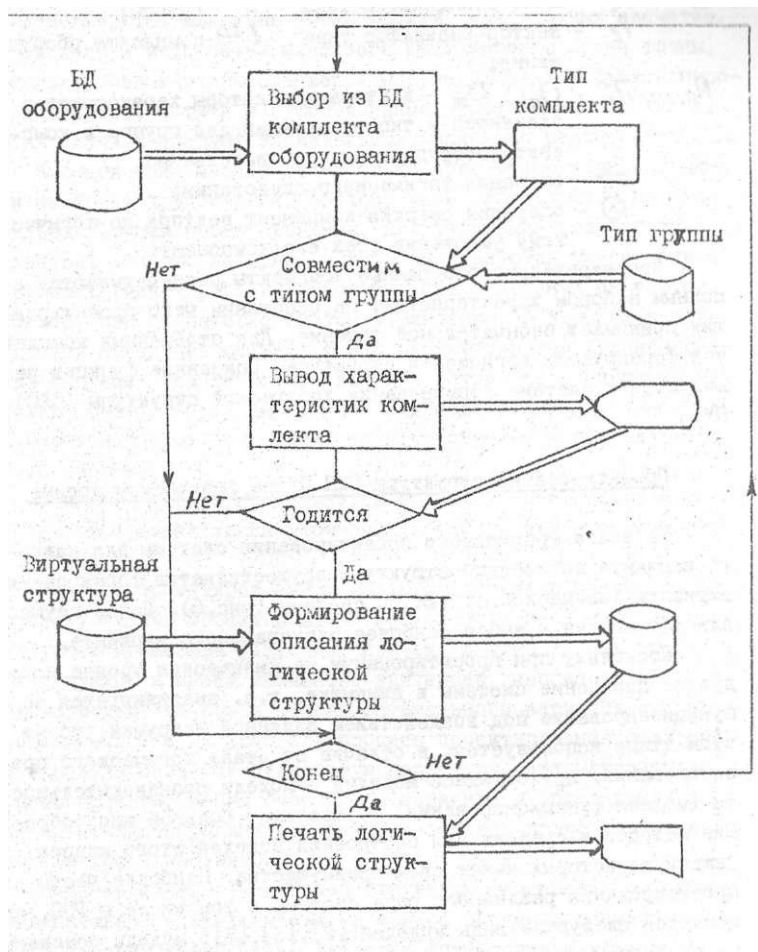


Рис. 5. Автоматизация проектирования структуры производства на логическом (технологическом) уровне

где Π_i - вектор-индикатор типа $i^{\text{ой}}$ группы;

P_E - вектор-индикатор типа $E^{\text{го}}$ комплекта оборудования;

$\Pi_{Pi}, \Pi_{PE}, O_{Pi}, O_{PE}$ - вектора-индикаторы характеристик элементов и типов операций для группы и комплекта оборудования, соответственно;

\Rightarrow - операция логического следования;

\otimes - операция свертки компонент вектора по логическому умножению всех его компонент.

Предварительно отобранные комплекты распечатываются с полным набором характеристик, на основании чего проектировщик принимает окончательное решение. Для отобранных комплектов формируется логическая структура. Списанные функции реализуются в системе формирования логической структуры (СЛС) СМП ПУ.

Проектирование структуры СМП ПУ на физическом уровне

На этапе физического проектирования системы для каждого варианта логической структуры осуществляется формирование варианта физической структуры системы (рис.6). Далее осуществляется анализ и выбор наиболее рационального варианта.

Поскольку при проектировании на физическом уровне исследуется поведение системы в динамике, т.е. анализируется ее функционирование под воздействием заданной нагрузки, то на этом этапе используется, в отличие от этапа логического проектирования, другой класс моделей - модели производительности (модели функционирования). Существует большое многообразие методов и средств для построения моделей этого класса, каждый из которых имеет свои преимущества. Наиболее часто для проектирования различного рода систем, в том числе и ГПС, применяются следующие виды моделей [2], [3],[7]: модели основанные на традиционных объемных расчетах, или модели средних значений, модели основанные на методах сетей массового обслуживания, имитационные модели и натурные модели.

Модели, основанные на объемных расчетах являются наиболее простыми, однако, и наиболее грубыми. Вследствие этого

они используются для лишь очень грубых, прикидочных расчетов.

Модели в виде сетей массового обслуживания более точны, поскольку позволяют учесть вероятностный характер функционирования системы, хотя и с существенными упрощениями, однако во многих случаях требуют значительных численных расчетов на ЭВМ

Имитационные модели являются гораздо более точными, однако и наиболее трудоемкими, поэтому чаще используются на значительных этапах проектирования, для уточнения результатов предыдущих этапов. Натурные модели используются уже на этапе разработки (макетирования) системы, или отдельных ее частей, например, при разработке систем управления. В этом случае исследуется поведение полностью или частично разработанной (макета) системы управления при взаимодействии ее с имитационной моделью объекта управления. Этот вид моделей предназначен для окончательной проверки проектных решений и проверки разработанной системы.

В данной работе предлагается сочетание этих видов моделей при последовательном уточнении и выборе варианта структуры системы.

Процесс проектирования в целом представлен на рис.6. Поскольку задача проектирования производственной системы требует учёта множества факторов, причем, многие из них трудно- формализуемы, и имеет множество критериев, многие из которых противоречивы, то поиск строго оптимального варианта является невозможным. В этих условиях процесс проектирования целесообразно реализовать как диалоговую процедуру, автоматизировав процесс проектирования очередного варианта и определение пока зателей функционирования системы, и оставив право выбора вариантов за проектировщиком.

Проектирование физической структуры начинается с формирования начального приближения на основе объемных расчетов; основной задачей этого этапа является формирование начального (предварительного) состава специализированных участков для обработки (сборки) выделенных групп ПУ. Общая методика этого проектирования для механообработки достаточно хорошо разработана [2], [3]. Применительно к СМП ПУ эту методику можно реализовать следующим образом.

На первом шаге осуществляется расчет количества единиц



Рис. 6. Схема проектирования организационно-технологической структуры СМП ПУ с использованием моделирования

оборудования и их загрузка для каждой группы ПУ, и соответственно, комплекта оборудования в сформированной логической структуре. При этом используются интенсивности потоков плат и элементов различного типа, определенные на виртуальном уровне проектирования с помощью АСКТА, и номинальная производительность оборудования. На втором шаге производится анализ сформированных физических структур для выделенных групп ПУ с точки зрения количества единиц оборудования и их загрузки, осуществляется формирование структуры участков путем объединения слабо загруженных комплектов, с учетом ограничений на размер участков, т.е. количество единиц оборудования в целом по участку и по отдельным операциям (норм управляемости). Может возникнуть также ситуация, когда большой объем работ по некоторой группе ПУ приведет к очень большому размеру соответствующего участка. В этом случае необходимо деление его на несколько одинаковых в соответствии с нормами управляемости.

С формальной точки зрения этот процесс соответствует объединению, или разделению подграфов логической структуры, соответствующих отдельным группам, исходя из ограничений норм управляемости и загрузки оборудования. При этом одновременно происходит превращение структуры этого графа из плоской в объемную (см. рис.1)

При использовании методов автоматического группирования ПУ, описанных выше, процесс формирования начального приближения, т.е. предварительной структуры участков может быть автоматизирован следующим образом [2], [3].

Определенные на предыдущих этапах проектирования группы ПУ упорядочиваются по определенным на первом шаге данного этапа коэффициентам загрузки оборудования и количеству единиц оборудования. За основу выбирается группа с наибольшей трудоемкостью, т.е. для изготовления которой требуется большее количество единиц оборудования. При этом может использоваться коэффициент относительной трудоемкости [2], который характеризует среднее количество единиц оборудования по всем операциям.

Если комплект для данной группы удовлетворяет нормам управляемости участка, то процесс формирования очередного участка заканчивается. Если он превышает допустимые размеры участка (нормы управляемости), то участок делится на несколько одинаковых. Если же условие "наполняемости" участка еще не удовлетворено, то к данной группе добавляется наиболее близкая в конструктивно-тех-

нологическом отношении группа ПУ, т.е. та, для которой расстояние по отношению к данной группе, определенное на этапе группирования ПУ, является минимальным.

Это соответствует объединению подграфов физических структур для этих групп. При этом суммарное количество единиц оборудования сокращается, поскольку недогруженные единицы используются совместно. Процесс формирования участка продолжается, пока не будет достигнуто условие "наполняемости" (норма управляемости участка).

После определения начального приближения структуры участков, осуществляется аналитическое (аналитико-численное) моделирование системы с использованием аппарата теории сетей массового оборудования.

При этом более подробно учитывается прохождение элементов материальных потоков по участкам (групп комплектов) в процессе их обработки (сборки). С использованием АСКТА, на основе характеристик транспортно-технологической тары осуществляется определение характеристик элементного состава группкомплектов для различных типов потоков.

На основании этого определяются средние времена обработки группкомплектов для различных типов модулей. При этом оценка времени обработки группкомплекта на отдельном модуле может быть проведена путем построения модели его работы с учетом его внутренней структуры на основе моделей средних значений, сетей массового обслуживания, или имитационных моделей работы модуля.

Может быть учтена также работа автоматизированного транспорта, надежность работа отдельных единиц оборудования и т.п.

Формирование исходных данных для построения модели в виде сети массового обслуживания осуществляется автоматизированным способом, используя накопленную информацию из базы данных. Формирование матрицы вероятностей осуществляется на основе маршрутов обработки определенных в логической структуре, распределений типов потоков, и количества единиц оборудования, определенных на этапе начального приближения. Характеристики времени обслуживания узла сети (модуля) и интенсивности потоков определяется, как было описано выше.

Определенные в процессе моделирования "узкие" места по производительности, могут "расширяться" автоматически, или в диалоге путем увеличения количества единиц оборудования, или изменения

состава, структуры системы.

В результате моделирования определяются основные показатели функционирования: производительность, объем незавершенного производства, длительность производственного цикла, загрузка единиц оборудования, размеры очередей на обслуживание (обработку) и т.п.

Имитационное моделирование проводится после анализа и выбора наиболее подходящего варианта структуры системы на этапе аналитического моделирования, с целью уточнения показателей ее работы.

Моделирование осуществляется с помощью компоненты моделирующего комплекса - системы имитационного моделирования (СИМ), которая реализуется, как проблемно-ориентированное расширение универсальной системы моделирования - пакета моделирования дискретных систем на Фортране (ПМДСФ). ПМДСФ является расширенным функциональным аналогом широко известной системы GPSS-V, обеспечивающим широкие возможности для построения проблемно-ориентированных СИМ.

Процесс построения имитационной модели СМП ПУ осуществляется в автоматизированном режиме. При этом используется информация из базы данных о выбранном варианте структуры системы, характеристики потоков и оборудования. Имитационные модели строятся из **ГОТОВЫХ** фрагментов и макроопределений, моделирующих работу системы в целом, и отдельных модулей. Разным типам модулей. Разным типам модулей соответствуют разные макроопределения.

Таким образом, настройка системы моделирования на исследуемый вариант СМП ПУ может производиться как на структурном, так и на параметрическом уровне.

По сравнению с аналитическими моделями имитационная модель позволяет учесть такие факторы, как соединение, разъединение потоков, синхронизацию их движения, точнее отразить законы обслуживания, правила и алгоритмы управления ресурсами, распределение потоков.

Использование моделей в процессе функционирования производства

Рассмотренный комплекс моделей может использоваться не только для проектирования организационно-технологической струк-

туры СМП ПУ, но и на этапе эксплуатации для автоматизации технологического проектирования, организационно-технологической подготовки производства, планирования и управления производством.

Разработанные формализованные представления основных элементов производственной системы - печатных узлов, плат, комплектующих элементов, технологического оборудования и техпроцессов могут являться основой для построения "сквозных" информационных описаний по всему циклу проектирования изделий, подготовки и управления производством. На этой основе может быть осуществлена разработка интегрированной базы данных ИАСУ СМП ПУ.

Комплекс моделей функционирования с разной степенью подробности (объемные, сетевые, имитационные) могут быть использованы на всех уровнях планирования производства: предприятие, цех, участок и является основой для построения систем оперативно-диспетчерского управления, или производственных операционных систем.

Модели производительности технологического оборудования для сборки печатных узлов

Модели функционирования технологического оборудования являются основным компонентом моделей организационно-технологической структуры СМП ПУ на физическом уровне. В общем случае, модели технологического оборудования могут строиться в зависимости от текущих целей исследования, с разной степенью детализации, с использованием различных методов.

Для разработки и исследования оптимальных организационно-технологических структур сборочно-монтажного производства целесообразно выделить два уровня представления моделей оборудования.

На первом (нижнем) уровне каждую единицу технологического оборудования (ТО) можно рассматривать как самостоятельную систему со своей внутренней структурой, состоящей из отдельных модулей, блоков, устройств, связанных определенным образом и имеющих свою локальную систему управления. На этом уровне исследуется поведение этой изолированной подсистемы под действием внешних материальных потоков (плат и комплектующих) и информационно-управляющих потоков от системы управления верхнего уровня.

Целями исследования могут быть следующие:

- определение оптимальной внутренней структуры отдельных единиц ТО при заданных характеристиках внешних потоков;

Эта задача возникает при проектировании сборочно-монтажного оборудования, исходя из конкретной области применения (типа и характера производств, конструктивно-технологических характеристик ПУ), или выбора оптимальной структуры оборудования из набора готовых модулей, или сравнения и выбора наиболее подходящего типа оборудования из известных для данного применения.

- определение "укрупненных" системных характеристик производительности ТО для построения модели второго уровня всей системы в целом;

- нормирование технологических процессов,

На втором(верхнем) уровне, в соответствии с принятым "ресурсным" подходом, каждая единица то рассматривается как системный ресурс активного типа ("технологический процессор"), имеющий характеристики производительности, которые на нижнем уровне рассмотрения могут быть определены как функции от характеристик действующих на него потоков и от внутренних свойств самого ТО. Целью исследования является определение оптимальной структуры системы в целом на этапе проектирования, либо оптимальное распределение материальных потоков в пространстве (по технологическим модулям, рабочим местам) и времени на этапе эксплуатации в системе оперативно-диспетчерского управления.

Для того, чтобы обеспечить возможность анализа и сравнения различных типов ТО, модели нижнего уровня (внутренней структуры) ТО будем строить на основе обобщения структур реальных ТО. В соответствии с этим каждую единицу ТО будем представлять в виде системы, состоящей из ряда обобщенных ("виртуальных") блоков, выполняющих определенные функции. Так же, как и при рассмотрении структуры системы в целом, блоки будем считать "ресурсами" данного ТО. Эти ресурсы могут быть двух типов: активного ("процессоры") - рабочие и транспортно-манипуляторные органы и пассивные-локальные накопители плат и комплектующих.

В качестве характеристик блоков будем рассматривать характеристики производительности - времени обработки, сборки, манипулирования, поиска, выборки в расчете на плату или элемент, а также емкостные характеристики накопителей.

В различных типах ТО соответствие виртуальных и реальных блоков(узлов) оборудования может быть разным. Некоторые

виртуальные блоки могут не иметь реальных представителей, или соответствовать нескольким реальным блокам и наоборот. Например, если выделить в составе ТО виртуальные блоки поиска, выборки, транспортировки и установки элементов на плату, то в сборочных центрах им будут соответствовать роботы-манипуляторы, а в СМС - оператор-монтажник. На рис.7,8 изображены типичные структуры ТМ сборки и комплектации.

Операции сборки ПУ можно разбить на переходы: загрузки плат, установки элементов, выгрузки готового ПУ. Установка каждого элемента состоит из поиска, выборки элемента из НК, транспортировки в рабочую зону, позиционирования платы или элемента, установки и закрепления элемента на плате.

Производительность работы технологического сборочно-монтажного оборудования в общем случае зависит от множества факторов:

- характеристик состава ПУ и расположения элементов на плате;
- характеристик самих технологических модулей (ТМ) - временных характеристик работы узлов и блоков, характеристик накопителей плат и комплектующих, организации хранения и доступа к накопителям и т.п.;
- характеристик транспортно-технологической тары, организации расположения элементов в таре и доступа к ним, способов комплектации;
- организационно-плановых характеристик транспортно-технологических партий (группкомплектов) -состава, количества, последовательности расположения и т.п.

При этом многие из этих факторов можно считать случайными. В связи с этим, производительность сборочно-монтажных ТМ так же имеет вероятностный характер и можно говорить лишь об оценке ее в виде средних значений.

Эти значения могут быть получены на основании моделирования его работы при известных характеристиках материальных потоков и внутренней структуры самих ТМ. Для моделирования ТМ, также, как и при моделировании всей системы в целом, можно использовать различные виды моделей - детерминированные (модели средних значений), сетевые и имитационные, в зависимости от текущих задач.

Для примера рассмотрим наиболее простой вид моделей - модели средних значений. Основная цель - получение количественных зависимостей производительности ТМ от вышеперечисленных факторов.

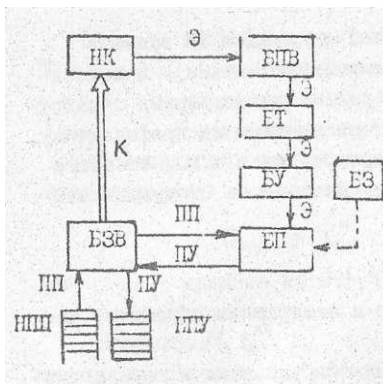


Рис.7. Структурная схема технологического модуля установки элементов на платы: НПШ - накопитель плат; НК - накопитель комплектующих; НПУ - накопитель печатных узлов; БВВ - блок поиска и выборки элементов из НК; БТ - блок транспортировки элементов в рабочую зону; БУ - блок установки элементов на плату; БЗ - блок закрепления элементов на плате; БП - блок позиционирования; БЗ - блок загрузки (выгрузки); ПП - печатные платы; ПУ - печатные узлы; ε - элементы; К - комплекты элементов.

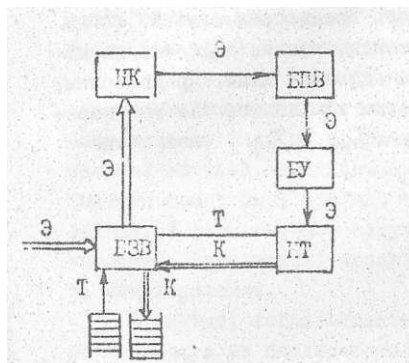


Рис.8. Структурная схема технологического модуля комплектации: НК - накопитель комплектующих или комплектосный склад; БТ - накопитель технологической тары для формируемых комплектов; Т - пустая тара; К - сформированные комплекты; БУ - блок установки элементов в технологическую тару

Будем считать, что обработка (сборка) на каждом ТМ ведется транспортно-технологическими партиями (комплектами). В качестве оцениваемых характеристик будем рассматривать время обработки комплекта. Если не учитывать потери времени на профилактику, техобслуживание, организационные мероприятия и т.п., то общее время обработки комплекта будет складываться из следующих составляющих:

$$T = T_{пз} + T_{пер} + T_{поз} + T_{обр}$$

где $T_{пз}$ - среднее время подготовки и завершения обработки комплекта,

$T_{пер}$ - среднее время переналадки оборудования и перезагрузки НК,

$T_{поз}$ - среднее время позиционирования в НК,

$T_{обр}$ - среднее время обработки (сборки) комплекта.

Рассмотрим ТМ установки элементов на платы, структуры которого приведена на рис.7. Предположим, что все переходы выполняются блоками модуля последовательно. Рассмотрим случай, когда элементы комплектуются в носители (ленты, чашки, кассеты) по номиналам и обрабатываются в порядке следования плат. Предположим что емкость НК достаточна для обработки комплектов без его пере загрузки. Тогда величины

$T_{пз}$, $T_{пер}$, $T_{поз}$, $T_{обр}$ можно оценить следующим образом:

$$T_{пз} = M \cdot T_{пзо}$$

$$T_{пер} \cdot K_n^{KT} \leq T_{пер} \leq M \cdot K_n^{KT} \cdot T_{пер0}$$

$$T_{поз} \approx M \cdot K_n^H \cdot T_{поз01}$$

$$T_{обр} = N_{элк} (T_2 + T_{пзс} + T_y + T_3)$$

где M - среднее количество плат в комплекте,

K_n^{KT}, K_n^{KT} - среднее количество конструктивно-технологических типов элементов в плате и комплекте, соответственно,

K_n^H - среднее количество номиналов на плате,

$N_{элк}$ - среднее количество элементов в комплекте,

$T_{пзо}$ - среднее подготовительно-заключительное время на плату,

$T_{пер0}$ - среднее время одной переналадки.

$T_{\text{позк1}}$ - среднее время позиционирования в НК,
 $T_{\text{в}}, T_{\text{пзс}}, T_{\text{ч}}, T_{\text{з}}$ - среднее время выборки элемента, позиционирования
 его, установки и закрепления на плате, соответственно.

Предполагая, что обращение к различным носителям в НК происходит
 равновероятным образом, T можно оценить величиной:

$$T_{\text{позк1}} = (K_{\text{кис}}^{\text{н}} \cdot T_{\text{позк0}}) / 2,$$

где $K_{\text{кис}}^{\text{н}}$ - среднее количество носителей в комплекте,

$T_{\text{позк0}}$ - среднее время перехода на одну позицию в НК.

Величины $M_1, K_{\text{к}}^{\text{кТ}}, K_{\text{п}}^{\text{кТ}}, K_{\text{п}}^{\text{н}}, K_{\text{кис}}^{\text{н}}, N_{\text{ЭАК}}$, характеризующие состав
 плат и комплектов могут быть получены с помощью АСКТА.

Аналогичные соотношения могут быть получены для других способов
 комплектации, а также для других технологических модулей.

Эти соотношения могут быть использованы для сравнительного
 анализа различных факторов (способов комплектации, характеристик
 состава ПУ, характеристик ТМ и пр.) на производительность отдельных
 модулей, локальной оптимизации работы ТМ, или выбора ТМ из некоторого
 множества.

Влияние этих факторов на производительность системы в целом может
 быть оценено только на модели всей системы, поскольку одни и те же
 факторы по разному влияют на производительность отдельных модулей на
 различных операциях. Построение модели всей системы может быть сделано
 на основе использования полученных оценок. В этом случае, полученные
 оценки позволяют значительно упростить (укрупнить) модель системы в
 целом и сократить затраты на моделирование.

В случае, когда отдельные блоки (узлы) модулей работают па-
 раллельно, а не последовательно, это может быть учтено введением
 коэффициентов совмещения (параллельности) работы отдельных блоков.

Более точные модели, более сложные случаи могут быть иссле-
 дованы с помощью имитационных моделей работы модулей. Причем, в
 этом случае производительность модуля также может быть выражена в
 аналитическом (приближенном) выражении, путем соответствующего
 планирования и обработки результатов имитационного эксперимента. Эти
 зависимости также могут быть использованы в модели
 работы всей системы.

Л и т е р а т у р а

1. Системное проектирование интегрированных производственных комплексов / Под общ. ред. В.М.Пономарева. - Л.: Машиностроение, 1986. - 319 с.
2. Петров В.А., Масленников А.Н., Осипов Л.А. Планирование гибких производственных систем. - Л.: Машиностроение, 1985. - 182 с.
3. Организационно-технологическое проектирование ГПС / Под общ. ред. С.П.Митрофанова. - Л.: Машиностроение, 1986. - 294 с.
4. Гибкое автоматическое производство / Под общ. ред. С. А. Майорова, Г.В.Орловского, С.Н.Халкиопова. - Л.: Машиностроение, 1985, - 454 с.
5. Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л. Управление гибкими производственными системами. - М.: Машиностроение, 1988. - 352 с.
6. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциальных функций в теории обучения машин. - М.: Наука, 1970. -384с.
7. Основы теории вычислительных систем / Под ред. С.А.Майорова. - М.: Высшая школа, 1978. - 408 с.
8. Технологическая подготовка гибких производственных систем / Под общ. ред. С.П.Митрофанова. - Л.: Машиностроение. 1987.-352с.
9. Ситуативное проектирование технологических процессов в гибкой автоматизированной производственной системе / Ю.М.Соломанцев, А.М.Басин, С.В.Климов. - Вестник машиностроения, 1984, №3, с.47-50.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
К.Ф.Скворцов Полирование прецизионных деталей в приборостроении.....	4
Ю.И.Нестеров. Обеспечение устойчивости процесса механической абразивной доводки в условиях регенеративного возбуждения при заданных ограничениях.....	50
С.О.Куприянов, Ю.Н.Новиков. Методы и устройства контроля параметров тонкопленочных покрытий в процессе осаждения	67
Е.В.Кротова. Оплавление покрытия олово-свинец в производстве печатных плат.....	101
К.И.Билибин Г.М.Пьяиов. Проектирование организационно-технологических структур сборочно-монтажных производств печатных узлов.....	113

З а к а з 1 0 3 5 . Формат 60x90/16. Усл.печ.л. 9,75 Уч.-изд.л. 9,18
Подписано в печать 26.07.89 Тираж 200 экз. Цена 90 коп. Изд. № 13. Л-18771
от 04.08.89.

Типография МГТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.