

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

МОСКОВСКИЙ СТАНКОИИСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

МАРИНИН ГЕННАДИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАНКОВ ДЛЯ АЛМАЗНОГО
ТОЧЕНИЯ ОСОБО ТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Специальность 05.03.01 – Процессы и машины обработки
материалов резанием; автоматические линии

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Научный руководитель
заслуженный деятель
науки и техники РСФСР,
доктор технических наук,
профессор ПУИ В.Э.

Москва – 1981

СОДЕРЖАНИЕ

| | СТР |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 8 |
| ГЛАВА 2. ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ..... | 23 |
| 2.1. Инструмент..... | 28 |
| 2.2. Изделие..... | 44 |
| 2.3. Режимы резания..... | 46 |
| 2.4. Смазочно-охлаждающая жидкость..... | 49 |
| 2.5. Удаление стружки..... | 50 |
| 2.6. Помещение..... | 52 |
| 2.7. Персонал..... | 54 |
| 2.8. Станок..... | 57 |
| 2.8.1. Параметры точности..... | 57 |
| 2.8.2. Вынужденные относительные колебания..... | 59 |
| 2.8.3. Опоры исполнительных органов..... | 64 |
| 2.8.4. Приводы исполнительных органов..... | 68 |
| 2.8.5. Жёсткость системы СПИД..... | 75 |
| 2.8.6. Остаточная неуравновешенность подвижных частей исполнительных органов..... | 76 |
| 2.8.7. Взаимное расположение траекторий движения исполнительных органов..... | 77 |
| 2.9. Изоляция от источников колебаний, расположенных вне станка..... | 78 |

| | |
|--|----|
| 2.10. Точение торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом..... | 83 |
| 2.11. Выводы..... | 91 |

ГЛАВА 3. ТОЧНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ
СТАНКА И ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ

| | |
|--|-----|
| ПОВЕРХНОСТИ..... | 94 |
| 3.1. Общее уравнение..... | 98 |
| 3.2. Анализ общего уравнения..... | 102 |
| 3.3. Точность формы и размера обработанной поверхности..... | 106 |
| 3.3.1. Влияние параметра R_u | 106 |
| 3.3.2. Влияние параметра α | 109 |
| 3.3.3. Влияние параметра α_1 | 110 |
| 3.3.4. Совместное влияние параметров α и α_1 | 111 |
| 3.3.5. Совместное влияние параметров R_u , α , α_1 .. | 111 |
| 3.3.6. Влияние параметра α_0 | 113 |
| 3.3.7. Влияние параметров γ_0 и β . Предвари- тельный анализ..... | 116 |
| 3.3.8. Влияние параметра γ_0 | 121 |
| 3.3.9. Влияние параметра β | 124 |
| 3.3.10. Совместное влияние параметров γ_0 и β ... | 134 |
| 3.3.11. Совместное влияние параметров R_u , α , α_1 , α_0 , γ_0 , β | 142 |
| 3.4. Выводы..... | 144 |

| | |
|--|-----|
| ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | I46 |
| 4.1. Экспериментальный стенд..... | I46 |
| 4.2. Условия и методика проведения экспериментов.... | I51 |
| 4.3. Результаты..... | I59 |
| 4.3.1. Параметр γ_0 | I59 |
| 4.3.2. Параметр β | I62 |
| 4.4. Выводы..... | I70 |
| 5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ..... | I71 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | I78 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | I84 |

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью современного точного машиностроения, в частности, вычислительной техники, приборостроения, оптико-механической промышленности является потребность в особо точных изделиях /например, диски памяти ЭВМ, цилиндры электрографических машин, металлические зеркала и т.п./ с шероховатостью поверхности R_z менее 0,025...0,1 мкм, отклонением формы менее одной угловой секунды /1 мкм на длине 200 мм/, местным отклонением формы /волнистостью/ менее 0,5 угловой секунды, а также с погрешностью взаимного расположения особо точных поверхностей менее двух угловых секунд.

Наиболее распространены следующие формы особо точных поверхностей /ОТ/ поверхностей:

1. Плоская /в плане круг, прямоугольник, шестигранник и т.п./;
2. Цилиндрическая /наружная и внутренняя/;
3. Коническая /наружная и внутренняя/;
4. Сферическая /выпуклая и вогнутая/;
5. Несферическая /осевая и внеосевая, в том числе: параболическая, эллиптическая, гиперболическая и т.п./;
6. Торговая /выпуклая и вогнутая/;
7. Комбинированная /например, ваксикон, многогранная призма и т.п./.

Широкое использование изделий с ОТ поверхностями в настоящее время сдерживается вследствие применения традиционных технологических методов окончательной обработки — шлифование, полирование, притирка и т.п.

Эти методы финишной обработки имеют ряд существенных недостатков, которые особенно ярко проявляются при обработке цветных металлов и их сплавов, применяемых при изготовлении изделий с ОГ поверхностями:

1. Сравнительно низкая производительность;
2. Шаржирование обработанной поверхности абразивом;
3. Значительная глубина дефектного слоя, полученного в результате окончательной обработки;
4. Относительно трудное управление процессом получения высокой точности формы обработанной поверхности;
5. Значительные потери от брака.

Указанные недостатки традиционных методов не присущи методу обработки лезвийным алмазным инструментом. Однако, до недавнего времени этот метод не находил широкого применения и использовался в тех случаях, когда обрабатываемая поверхность получается методом копирования режущей кромки инструмента /например, врезное точение в часовой промышленности, нарезание штрихов на штриховых шкалах, изготовление дифракционных решёток и т.п./. К станкам для обработки этим методом предъявляются сравнительно низкие требования по вибрационным и точностным характеристикам. Поэтому были созданы станки высокой точности для обработки методом копирования с максимальным использованием возможностей конструкций прецизионных станков 50-х и 60-х годов.

Для обработки ОГ поверхностей больших размеров необходимо создание специальных особо точных станков, имеющих значительно более высокие вибрационные и точностные

характеристиками.

Основное внимание в настоящей работе уделено разработке и исследованию станков для алмазного точения плоских и сферических 0Γ поверхностей лезвийным режущим инструментом. Работу консультировал старший научный сотрудник, кандидат технических наук Шиманович М. А.

ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В литературе широко применяются различные термины, определяющие уровень точности /например, прецизионная деталь, высокоточная обработка, станок особо высокой точности и т.п./ и часто вне контекста сложно определить что понимать под тем или иным термином. Поэтому условимся, что в данной работе особо точной /ОТ/ поверхностью называется поверхность, определяемая одним или несколькими параметрами точности, имеющими предельные по существующим нормативам значения или превосходящие их.

Например, по ГОСТ 2789-73 "Шероховатость поверхности" установлена наименьшая высота неровностей $R_z = 0,025 \dots 0,05$ мкм, следовательно, если поверхность имеет шероховатость менее $0,025 \dots 0,05$ мкм, то назовём её особо точной поверхностью. Или, например, по ГОСТ 10356-63 "Отклонения формы и расположения поверхностей" установлено для интервала длин $160 \dots 400$ мм предельное отклонение от плоскостности по наимвышей I степени точности $1,6$ мкм, следовательно, если поверхность размером $160 \dots 400$ мм имеет отклонение формы менее $1,6$ мкм, то назовём её особо точной поверхностью.

Условимся также, что если ОТ поверхность определена по одному параметру точности, то она будет называться однопараметрической ОТ поверхностью, а если ОТ поверхность определена по двум параметрам точности, то она будет называться двухпараметрической ОТ поверхностью и т.д.

Следует отметить, что чем больше параметров точности определяют ОТ поверхность, тем сложнее её изготовить.

Всякая поверхность и тем более особо точная характеризуется точностными требованиями, предъявляемыми к ней. В наиболее общем виде параметры точности можно разбить на три группы /рис. I.1, I.2/:

1. Точность формы - степень приближения к идеальной заданной форме поверхности с учётом макро- и микро-неровностей [9]:

- отклонение формы /рис. I.1б/ - волнистость с шагом большим размера обрабатываемой поверхности /например, неплоскостность, некруглость, несферичность, нецилиндричность и т.п./;
- местное отклонение формы /рис. I.1в/ - волнистость с шагом меньшим размера обрабатываемой поверхности и большим базовой длины при измерении шероховатости этой поверхности;
- шероховатость /рис. I.1г/ - микронеровности поверхности в пределах базовой длины.

2. Точность расположения относительно других поверхностей - степень приближения к заданному идеальному расположению относительно других поверхностей /например, непараллельность, неперпендикулярность, несоосность и т.п./.

3. Размерная точность - степень приближения к заданной идеальной величине размера /например, длина, диаметр, радиус сферы и т.п./.

Кроме параметров точности в металлооптике обязательно определяется характеристика оптической чистоты, нормы которой регламентированы по ГОСТ 11141-65. Например, если поверхность аттестуется по классу оптической чистоты Р1У,

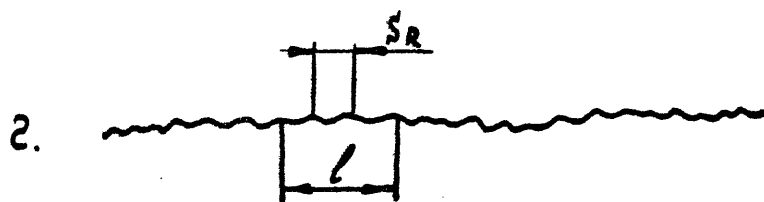
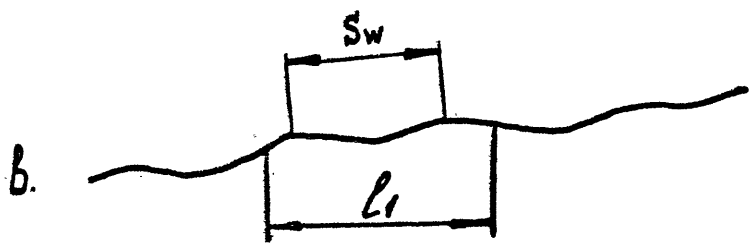
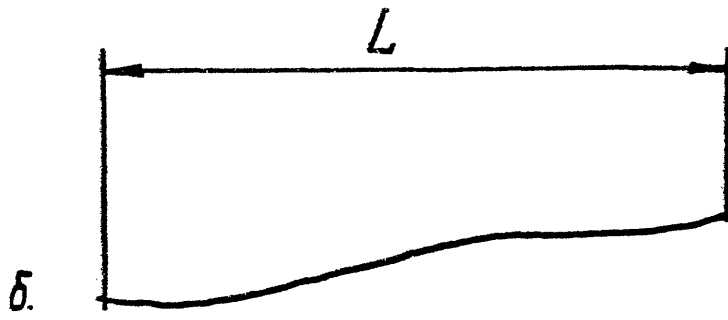
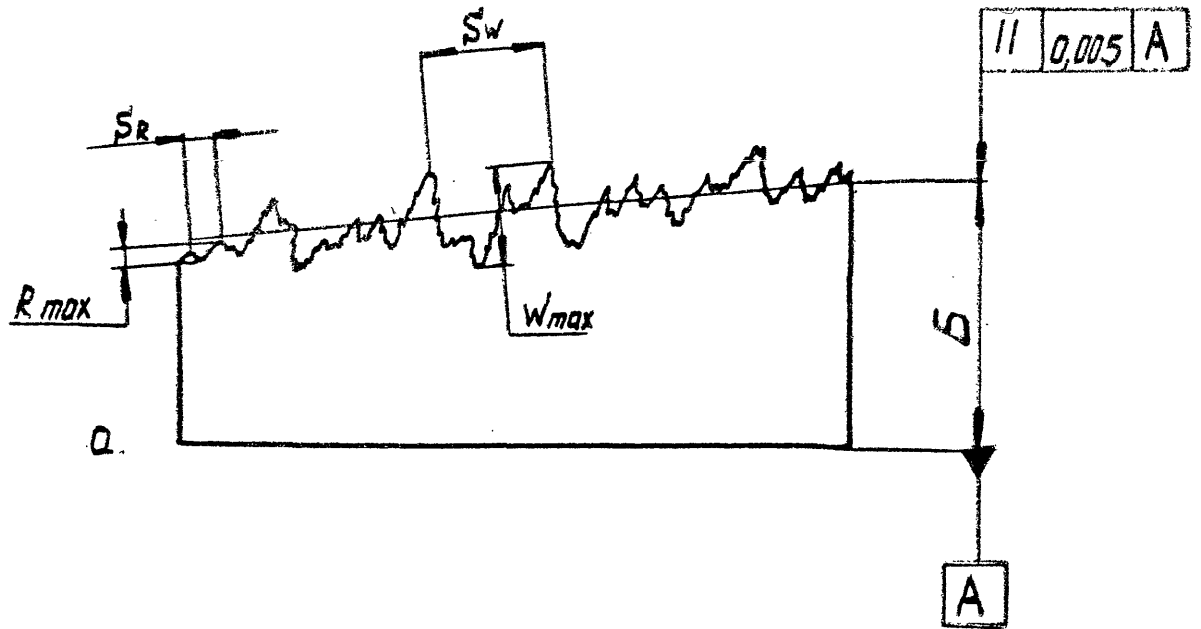


Рис.1.1. Неровности профиля поверхности.

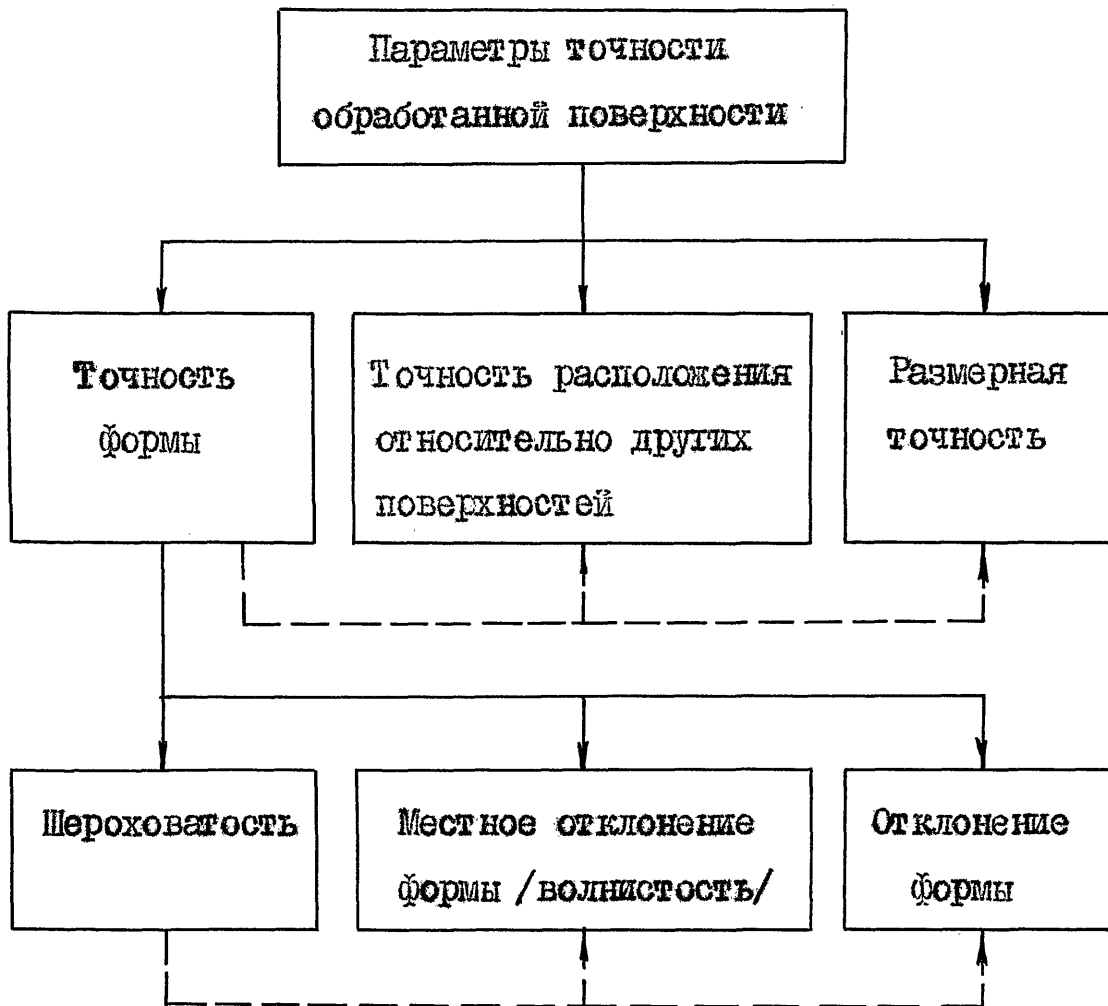


Рис.1.2. Классификация параметров точности обработанной поверхности.

то на ней допускаются:

- царапины шириной не более 0,02 мм суммарной длиной в два световых диаметра, т.е. для торцовой поверхности диаметром 200 мм - не более 400 мм;
- точки диаметром не более 0,3 мм в количестве не превышающем половины светового диаметра, т.е. для торцовой поверхности диаметром 200 мм - не более 100 штук.

Требование обеспечения оптической чистоты заставляет обратить особое внимание в первую очередь на качество материала обрабатываемой поверхности и на недопустимость повреждения обработанной поверхности как в период обработки на станке, так и при последующих за ней операциях съёма детали со станка, её транспортировки и хранения.

Алмазная обработка является одним из прогрессивных и высокопроизводительных процессов обработки ОП поверхностей из различных материалов. Алмазная обработка производится двумя видами инструмента:

- абразивным /с закреплёнными абразивными зёрнами и свободным абразивом/;
- лезвийным /точение, фрезерование и т.п./.

Советские и зарубежные учёные активно исследуют физическую сущность процессов алмазной обработки и сопровождающие её явления. Рассмотрению вопросов, относящихся к раскрытию основных закономерностей процессов алмазной обработки абразивным инструментом посвящено большое количество работ. Например, в работах [4] , [45] , [48] , [10] обобщаются исследования в области алмазной обработки абразивным инструментом оптических деталей, деталей

приборов и алмазов в бриллианты.

Природные алмазы обладают уникальными свойствами [10], [16]:

1. Высокой твёрдостью /~ в 5 раз больше, чем у корунда/;
2. Высокой износостойкостью /в сотни раз превышает износостойкость твёрдого сплава/;
3. Низкой степенью сжимаемости /модуль упругости ~ в 1,6 раза выше, чем у твёрдого сплава/;
4. Высокой теплопроводностью /~ в 2,5...5,4 раза больше, чем у твёрдого сплава/;
5. Низким коэффициентом линейного расширения /~ в 5 раз меньше, чем у твёрдого сплава/.

Эти свойства натурального алмаза позволяют создать лезвийный режущий инструмент /рис.1.3/ с чрезвычайно острой /по некоторым оценкам [52] радиус округления режущей кромки 0,025 мкм/ бездефектной режущей кромкой, способный производить тончайшее /глубиной 0,075 мкм/ резание цветных металлов с сохранением первоначальных режущих свойств при значительном пути резания.

Однако, область использования алмазного лезвийного режущего инструмента ограничена его сравнительно низкой теплостойкостью. Уже при температуре 850...1000°C [10] на воздухе начинается окисление алмаза. Поэтому процесс резания должен производиться в условиях, обеспечивающих температуру в зоне резания ниже 800°C. К существенному ограничению использования алмазного лезвийного режущего инструмента приводит свойство [49] природного алмаза вступать в химическую реакцию при высоких температурах

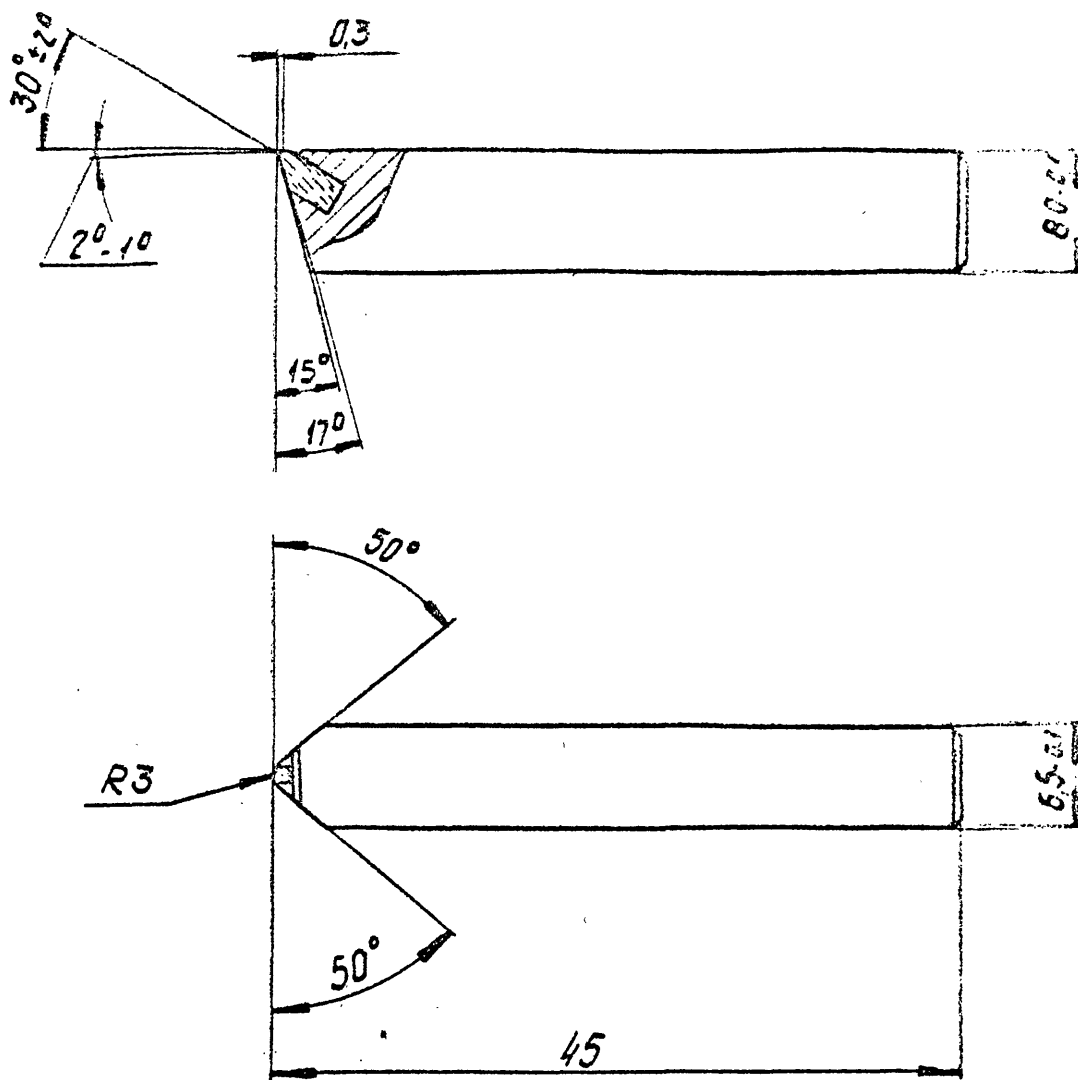


Рис. I.3. Алмазный резец.

с вольфрамом /W/, танталом /Ta/, титаном /Ti/, цирконием /Zr/, а также свойство плавиться при смешивании с расплавленными металлами - железом /Fe/, марганцем /Mn/, никелем /Ni/. Если указанные вещества присутствуют в обрабатываемом материале, то при определённых условиях алмаз может проявить химическую активность в отношении этих веществ, что приведёт к повышенному износу и связанным с этим последствиями.

Износостойкость /путь резания до переточки/ алмазного лезвийного режущего инструмента в первую очередь зависит от уровня внутренних напряжений в монокристалле, от качества /однородности структуры и физико-механических свойств, отсутствия инородных включений, пор, раковин и т.п./ обрабатываемого материала и соблюдения условий благоприятного резания /т.е. исключение недопустимого перегрева режущей кромки, вызванного излишне большими силами резания из-за: недопустимо большой глубины резания, недопустимо большой подачи, отсутствия СОЖ или т.п./.

Практически наилучшие результаты получаются при обработке следующих материалов: алюминий /Al/, медь /Cu/, серебро /Ag/, золото /Au/, некоторые алюминиевые сплавы.

Первые работы по алмазному точению ещё во время второй мировой войны проводила фирма "Cooke Optical" /США/ [52]. В нашей стране широкие исследования по алмазной обработке развернулись после открытия отечественных месторождений в Якутии в 1956 году. В начале 60-х годов в НИИЧаспроме выполнен цикл работ [16] по изучению факторов, влияющих на качество обработанной поверхности при

строгании, точении и фрезеровании алмазными резцами; определены оптимальная геометрия инструмента и рациональные методы обработки деталей часовой промышленности из цветных металлов, их сплавов и органического стекла. Эти работы показали возможность алмазной обработки лезвийным режущим инструментом деталей часовых механизмов по I-2 классам точности с шероховатостью поверхности $R_z = 0,8 \dots 0,1$ мкм. Причём уже эти первые исследования привели к выводу, что металлорежущее оборудование, выпускаемое промышленностью для обработки быстрорежущим и твёрдосплавным инструментом, не удовлетворяет требованиям обработки лезвийным алмазным инструментом.

Алмазная обработка ОГ поверхностей лезвийным режущим инструментом до недавнего времени не могла соперничать с "классической" алмазной обработкой абразивным инструментом, так как не были созданы соответствующие станки. Однако, в начале 70-х годов, после глубоких исследований и разработки промышленных конструкций гидростатических и аэростатических опор исполнительных органов металлорежущих станков /в нашей стране и за рубежом/ появилась возможность создания оборудования, обеспечивающего обработку особо точных поверхностей алмазным лезвийным режущим инструментом.

Исследования в области алмазной обработки ОГ поверхностей лезвийным режущим инструментом ведутся с конца 60-х годов. Большое внимание этому способу обработки уделяют: фирма "Bryant Symans" /Великобритания/, фирма "Hembrug" /Нидерланды/, американские фирмы "Union

Carbide, "Perkin-Elmer", "Dow Chemical" и лаборатории "Lawrence Livermore Laboratories", "Battelle Pacific Northwest Laboratories", а также исследовательская лаборатория в Лос-Аламосе [35], [52].

С 1972 года на Московском станкостроительном заводе "Красный пролетарий" совместно с ВНИИМАЛМАЗ6М, СТАНКИНОм, ЭНИМСом и рядом предприятий-заказчиков проводятся работы по созданию специальных станков для алмазного точения ОП поверхностей.

На первом этапе работа была направлена на создание станка для алмазного точения основы диска памяти ЭВМ /рис.1.4/, у которого основной параметр точности - шероховатость торцовой поверхности / R_z менее 0,025 мкм/, а затем - на создание станка для алмазного точения торцовых плоских и сферических ОП поверхностей с минимальным центральным дефектом.

В отечественной практике в то время не было опыта создания таких станков, а зарубежные публикации носили в основном рекламный характер. Поэтому для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выявить факторы, оказывающие влияние на точность обработанной поверхности.
2. Разработать способ обработки ОП поверхностей /плоских и сферических/.
3. Теоретически проанализировать и экспериментально проверить взаимосвязь между параметрами настройки станка и точностью обработанной поверхности для поверхностей второго порядка /включая плоскость/.
4. Разработать конструкции основных узлов и станка в целом,

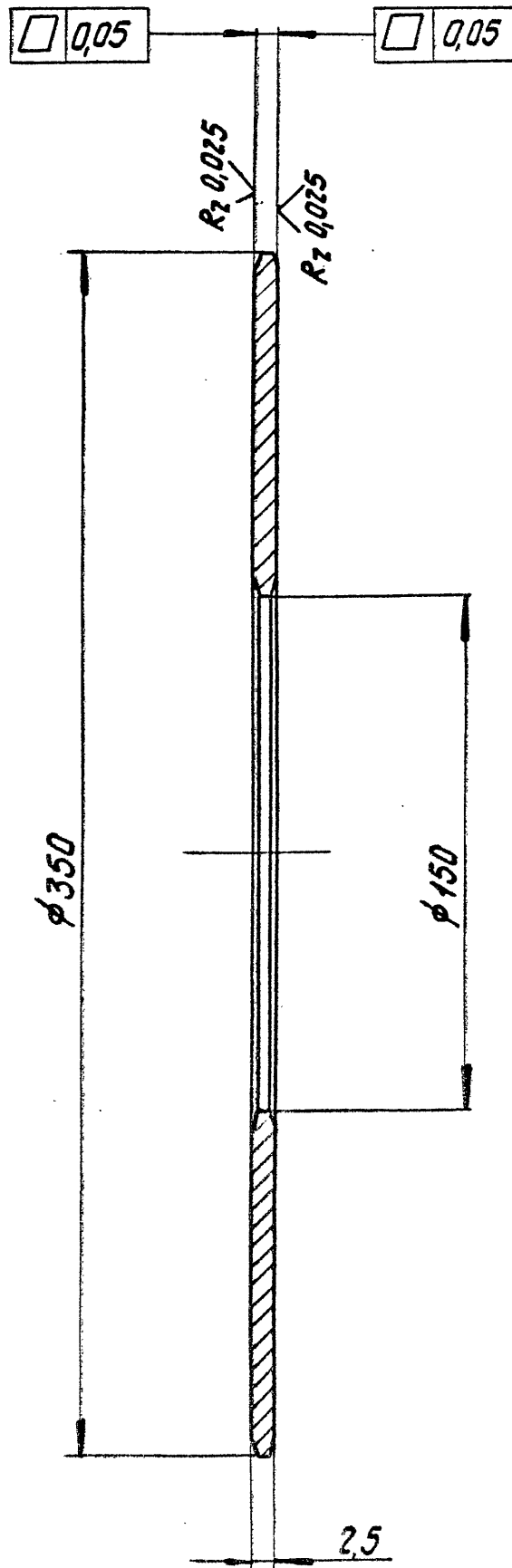


Рис. I.4. Основа диска памяти ЭВМ.

обеспечивающие алмазное точение ОТ поверхностей.

Для решения задач первого этапа, как наиболее рациональная, была выбрана методика эвристического экспериментального поиска. Был создан опытный стенд на базе станка мод. 16Б20А /рис.1.5/, исследованы его характеристики, внесены изменения, проведены повторные исследования и т.д. Затем был разработан, изготовлен и исследован экспериментальный станок мод. МК 6511 /рис.1.6/ и только после этого разработан и изготовлен серийный станок мод. МК 6512 /рис.1.7/.

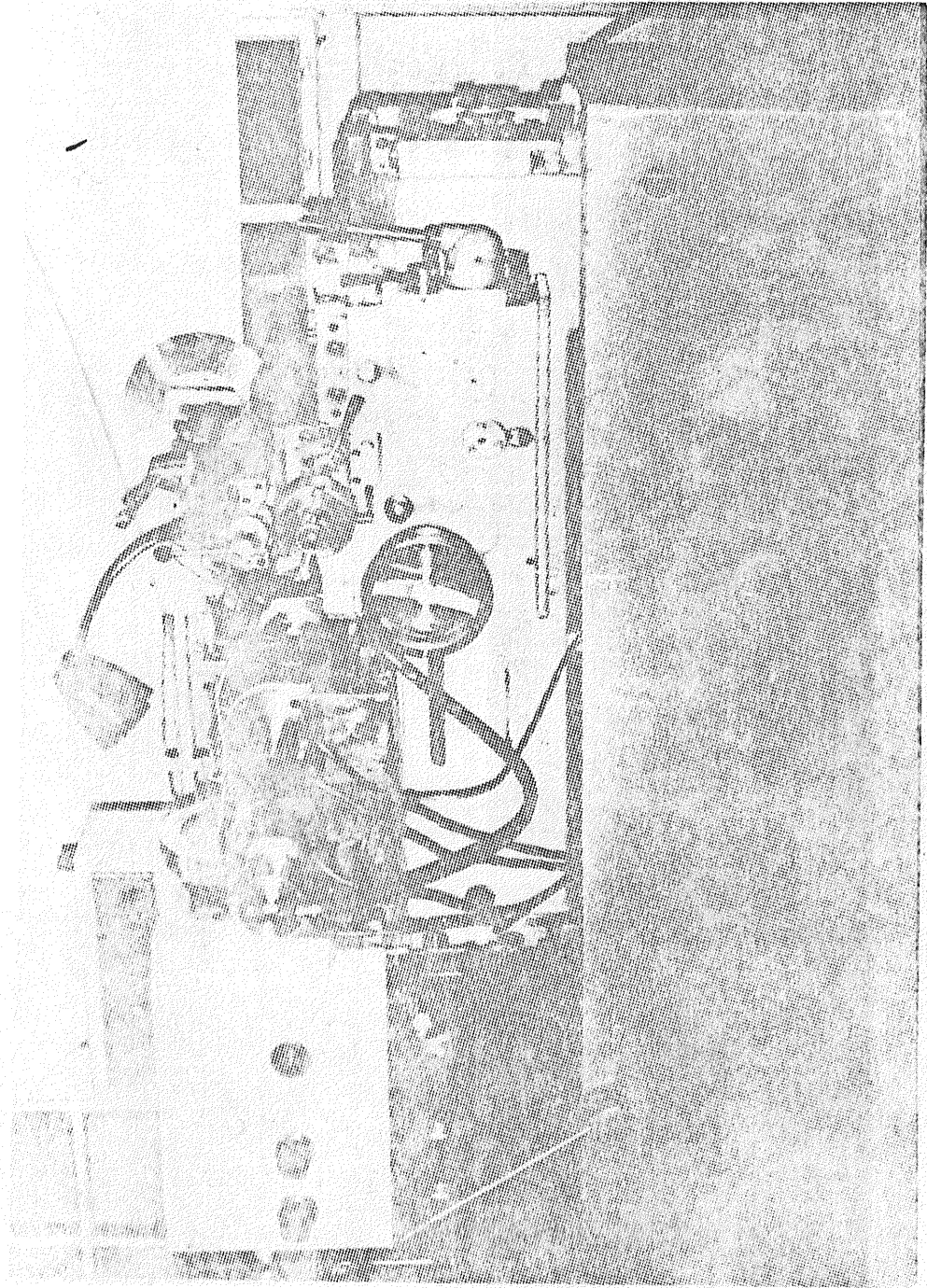


Рис. 1.6. Стенд для ультразвуго лочения плоских ОТ поверхностей

Или более подробно см. ГИССОА /.

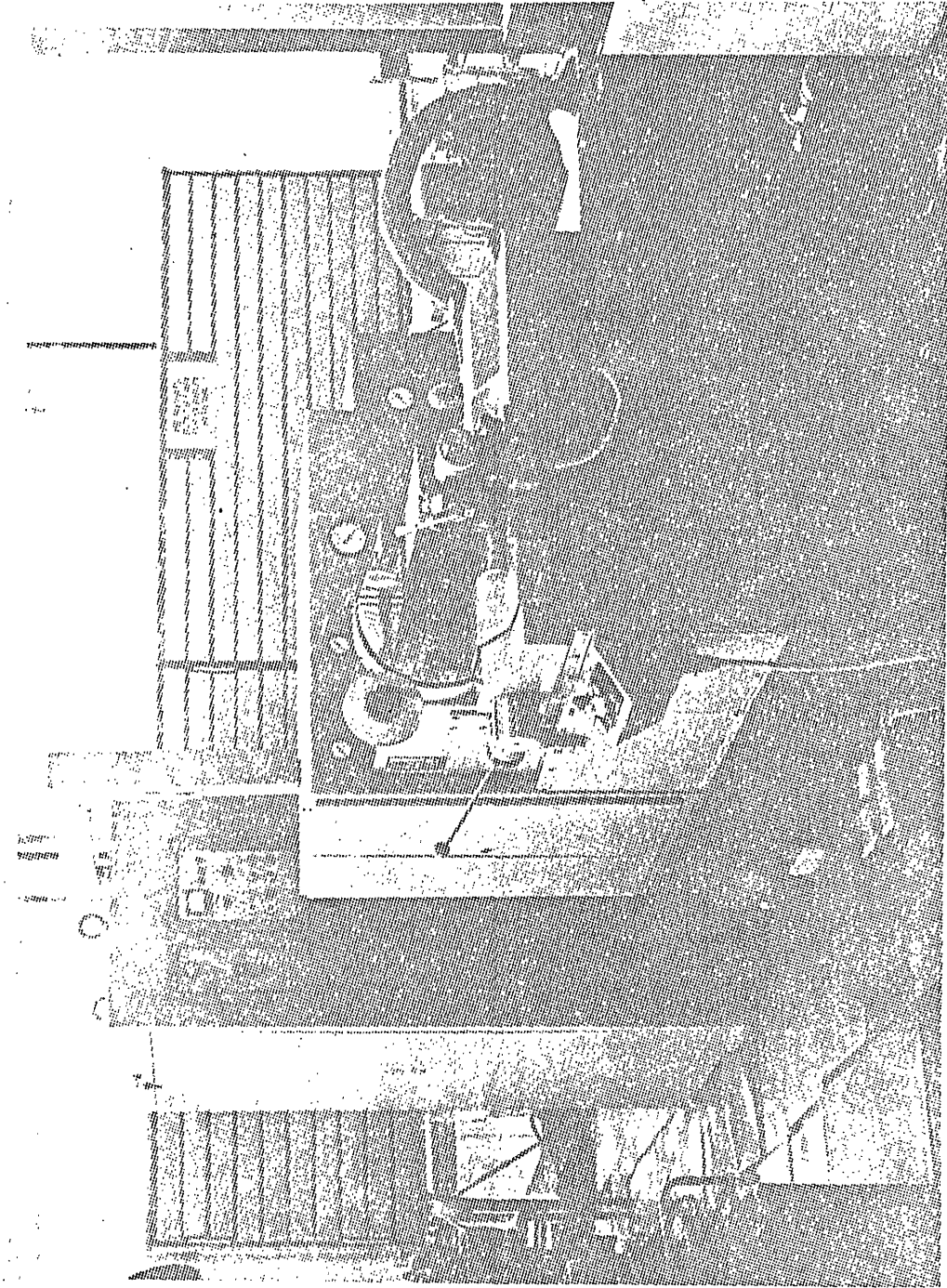


Рис. 1.6. Электромеханический особо точный станок мод. МК 65II
для алмазного точения дисков.

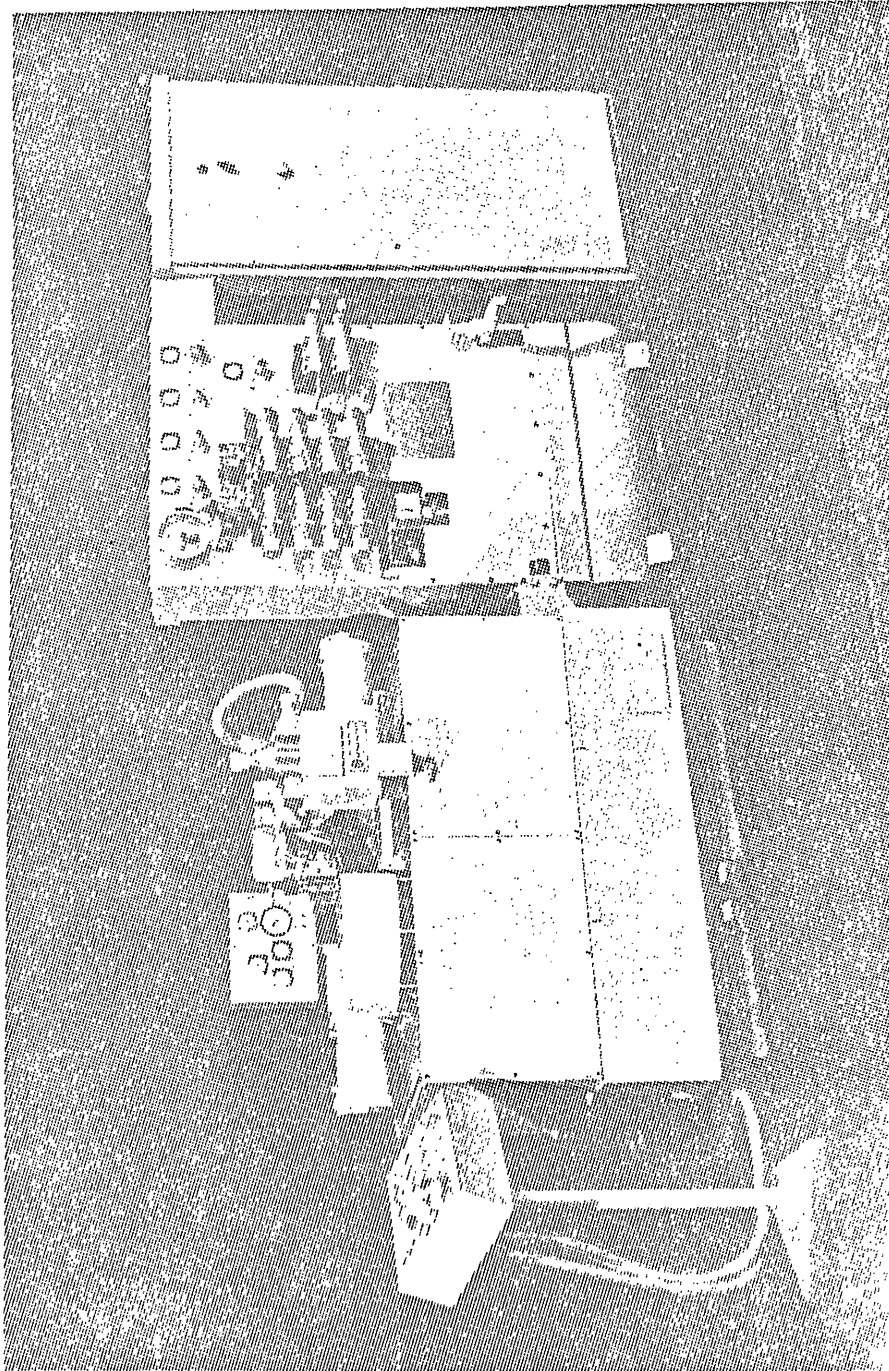


Рис. 1.7. Особо точный станок мод. МК 6512
для алмазного точения дисков.

ГЛАВА 2. ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Анализ литературных данных [5] , [7] , [16] , [17] , [35] , [37] , [38] , [47] , [49] и значительный практический опыт, накопленный на Московском станкостроительном заводе "Красный пролетарий" при создании станков для алмазного точения OT поверхностей совместно со специалистами ВНИИАлмаза, СТАНКИНА, ЭНИМСа и ряда предприятий-заказчиков оборудования позволили выявить факторы, оказывающие влияние на параметры точности OT поверхности, которые показаны на рис. 2.1...2.7. Рассмотрены факторы, влияющие на точность токарной обработки. Подавляющее большинство этих факторов необходимо учитывать и при других видах обработки лезвийным алмазным режущим инструментом.

Опыт показывает, что при обработке OT поверхностей решающее значение имеют все факторы технологического процесса и нельзя пренебрегать ни одним из них каким бы маловажным он нам ни показался.

Рассмотрим влияние выявленных факторов на точность обработанной поверхности. Ниже автор изложил результаты, полученные в ходе исследований, разработки и отладки и ввода в эксплуатацию станков для алмазного точения OT поверхностей.

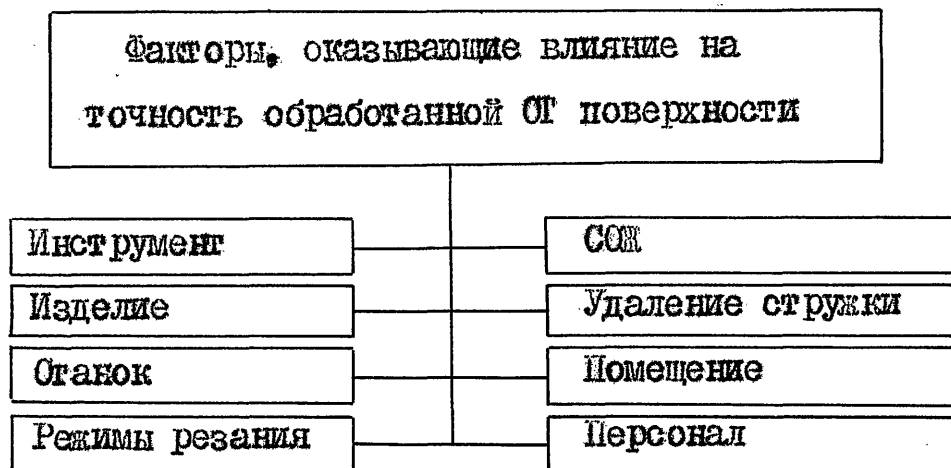


Рис.2.1. Комплекс факторов, влияющих на точность обработанной ОГ поверхности.

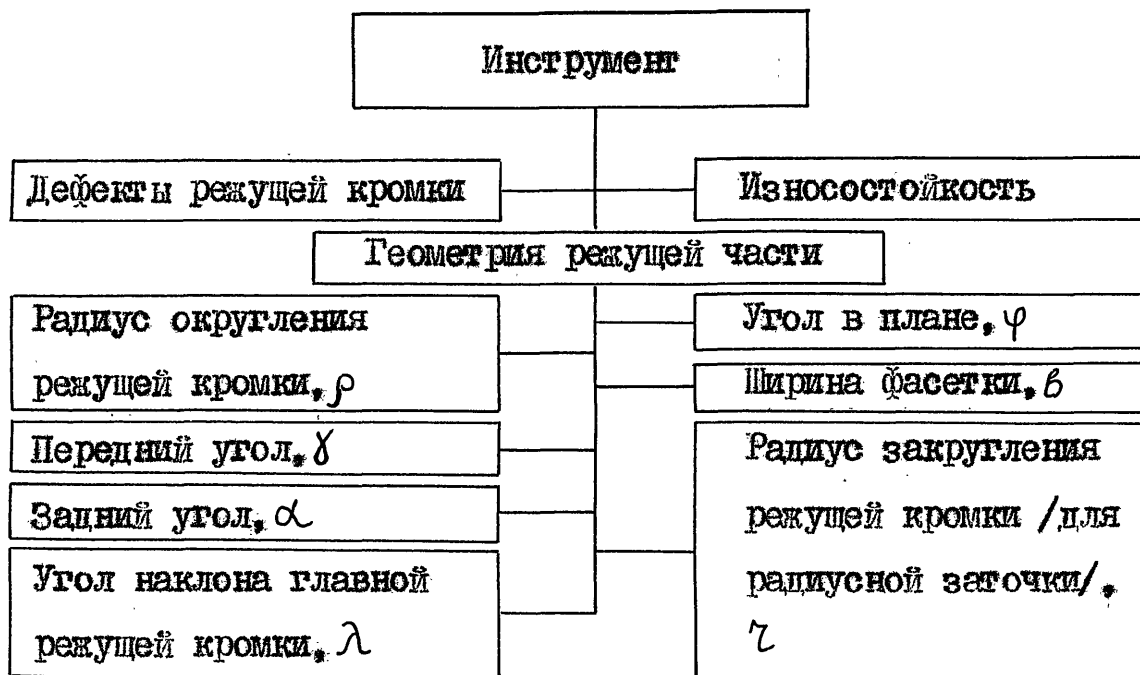


Рис.2.2. Система факторов "Инструмент".

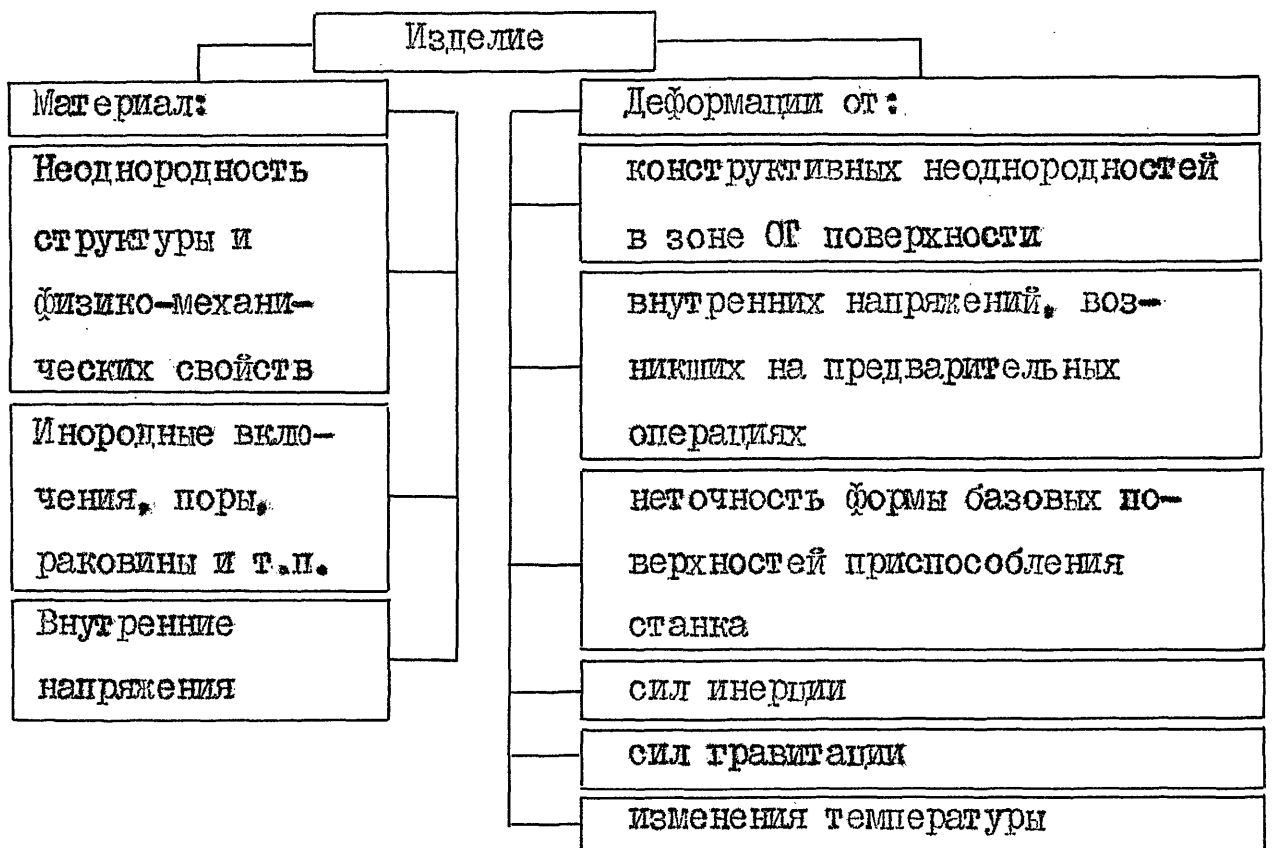


Рис.2.3. Система факторов "Изделие".

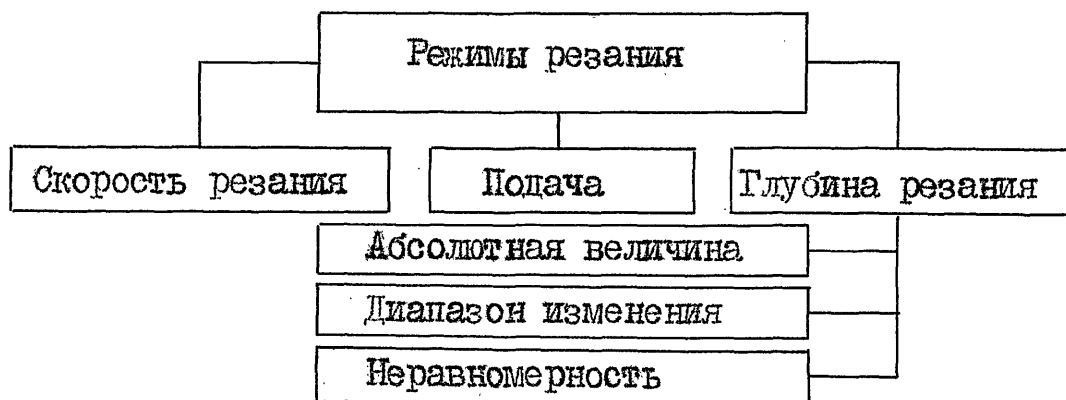


Рис.2.4. Система факторов "Процесс резания".



Рис.2.5. Система факторов "Окружающая среда".



Рис.2.6. Система факторов "Персонал".

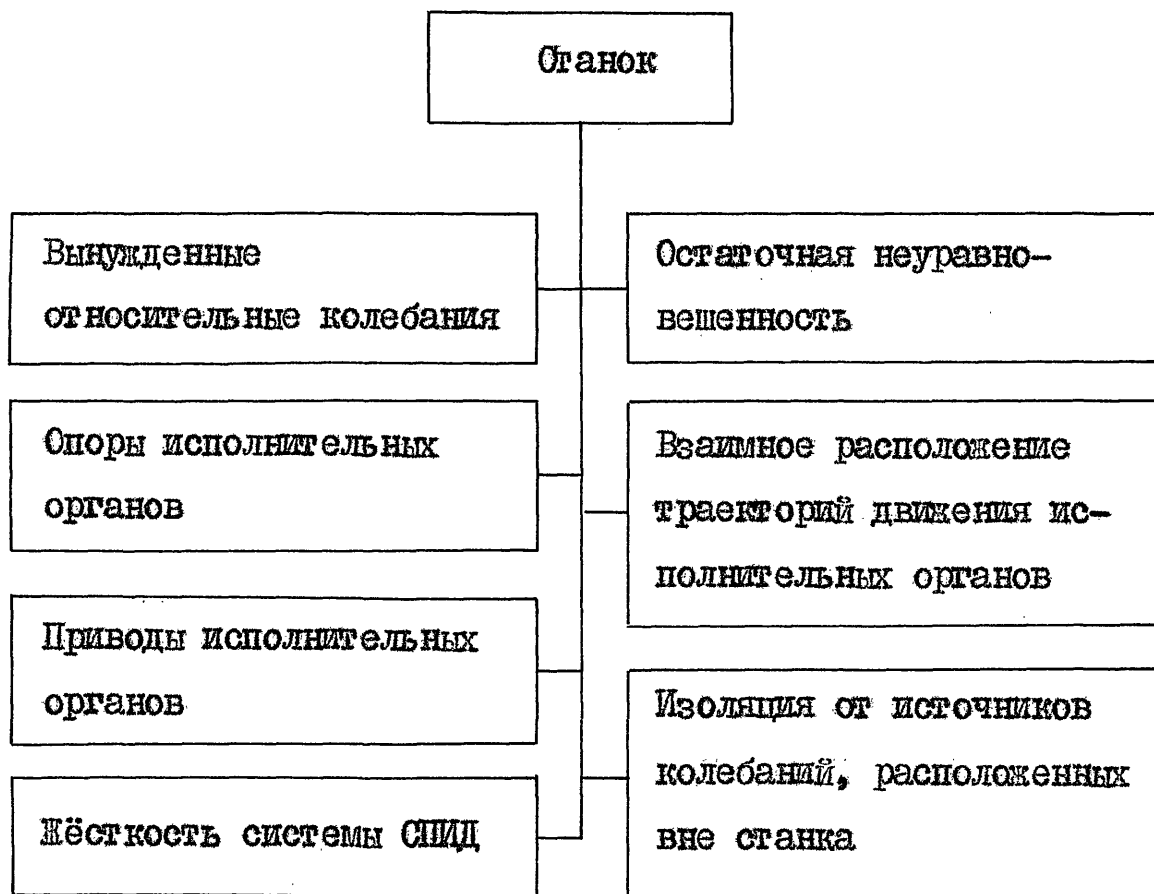


Рис.2.7. Система факторов "Станок".

2.1. ИНСТРУМЕНТ

Наиболее важным критерием качества режущего инструмента, определяющим его пригодность для обработки ОТ поверхности, является отсутствие дефектов режущей кромки. Если на режущей кромке имеется скол, то во время резания на рваных краях скола образуется нарост, который оставляет на обработанной поверхности следы /микронеровности/, снижающие качество обработки /увеличивающие шероховатость/. Допустимая величина скола на режущей кромке определяется из условия, что микронеровности, образованные из-за наличия этого скола не должны превышать заданной величины.

На практике, контроль режущей кромки инструмента производят на микроинтерферометре Линника МИИ-4 /рис.2.8/ при увеличении $500\times$. Установлено, что для обработки с шероховатостью R_z менее 0,025 мкм не допускается наличие видимых сколов на режущей кромке резца при увеличении $500\times$.

При благоприятных условиях износостойкость инструмента может достигать очень больших значений. Например, при испытаниях станка мод. МК 6513 [36] обрабатывалась торцовая поверхность заготовки диаметром 250 мм из меди М0БТУ 43-21-283-77 с подачей 15 мкм на один оборот шпинделя резцом типа ИР-227 и после 9-ти проточек путь, пройденный резцом составил около 30 км. Контрольное измерение шероховатости показало, что после 9-ти проточек величина R_z не превышала 0,025 мкм /рис.2.9/.

Физического предела износостойкости режущего инструмента при рассматриваемом виде обработки пока выявить не удалось. Практически, износостойкость инструмента в пода-

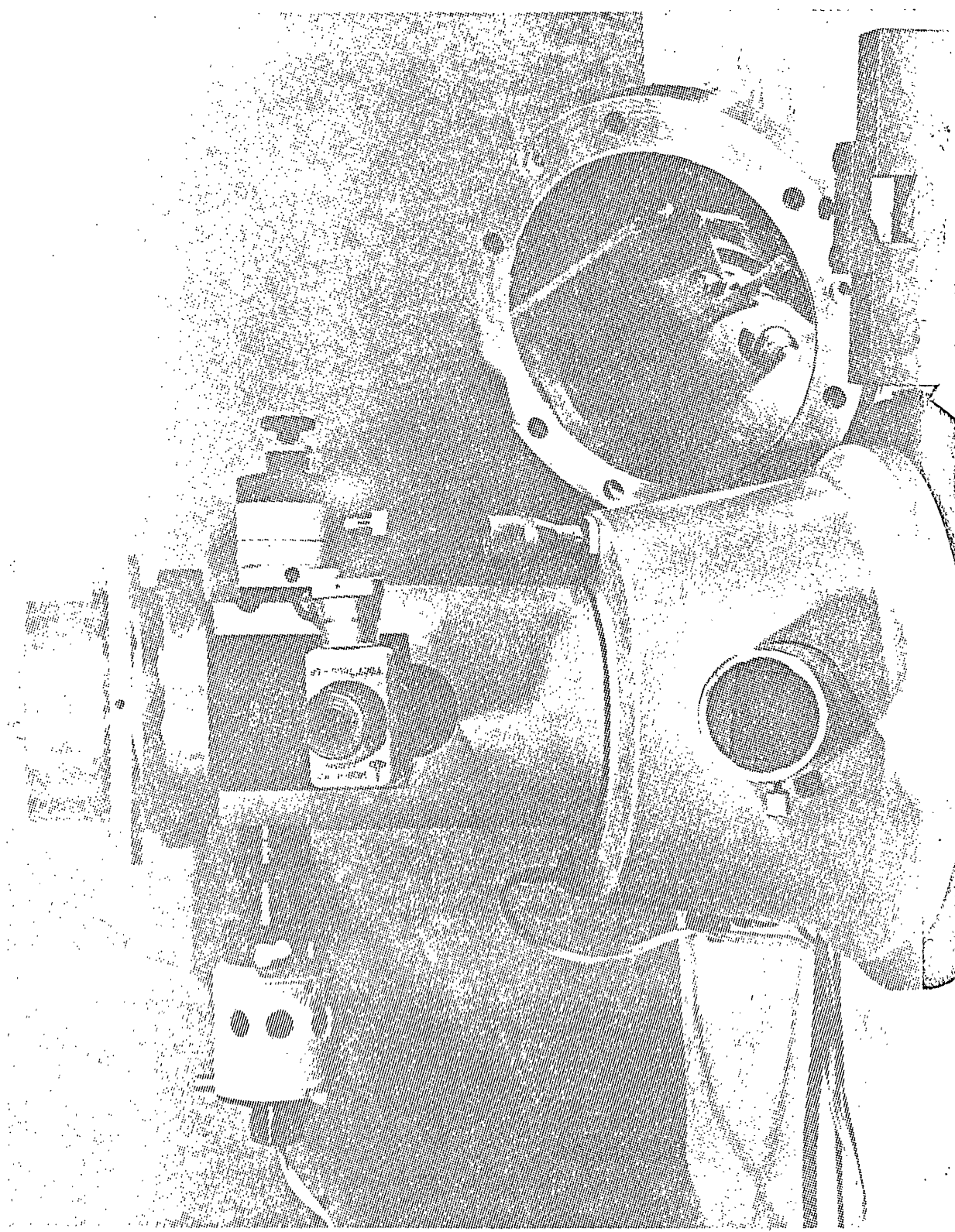


Рис. 2. 8. Микроинтерферометр ММТ-4У42 и контролируемый образец / в нерабочем положении /.

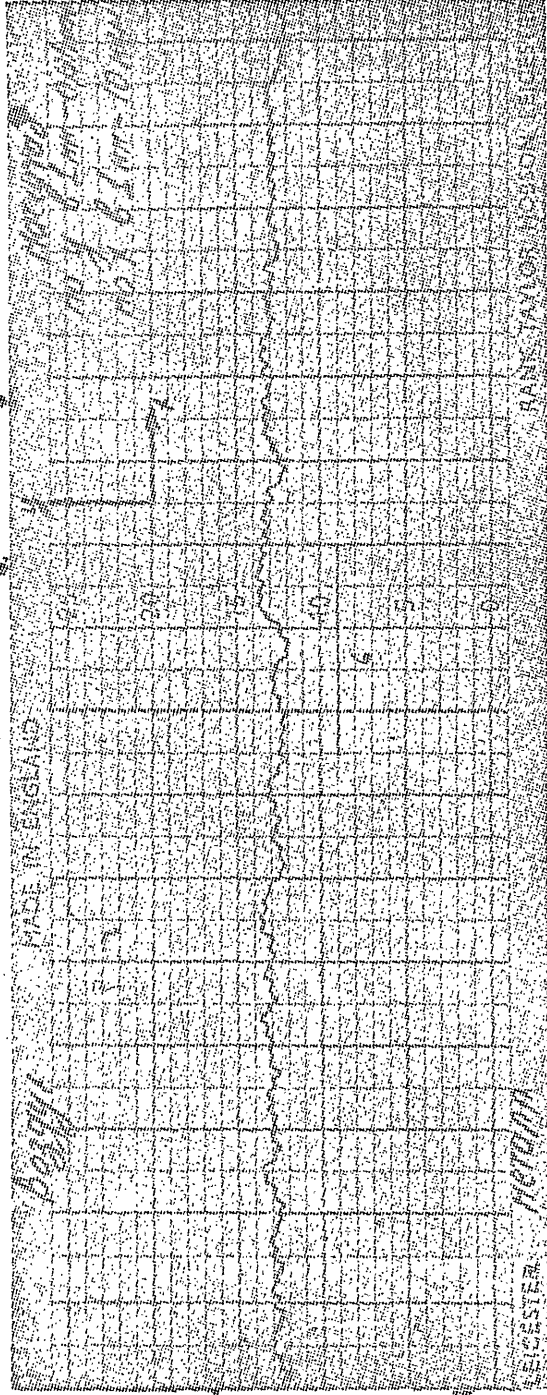


Рис. 2.9. Профильграмма поверхности образца из меди МОВ на 30-м километре пути резца.

вляющем большинстве случаев определяется вероятностью возникновения ситуации, при которой на режущей кромке образуется дефект. Например, из-за неумелого обращения обслуживающего персонала с резцом, из-за перерыва в подаче СОЖ в зону резания, из-за наличия твёрдого включения в обрабатываемом материале и тому подобных случайных факторов.

Большое влияние на точность формы и размера обработанной поверхности оказывают геометрические параметры режущей части инструмента. Важнейшим из них является радиус округления режущей кромки r , который по некоторым оценкам [52] может достигать значения 0,025 мкм. Столь малый радиус округления режущей кромки позволяет производить тончайший срез обрабатываемого материала толщиной в несколько десятых долей микрометра с минимальными усилиями.

Для оценки предельных параметров шероховатости обработки ОП поверхностей методом алмазного точения и исследования структуры обработанной поверхности была произведена проточка трёх пар образцов из материала - медь М0Б. Диаметр обработанной поверхности - 6 мм. Непосредственно после проточки обработанные поверхности были покрыты специальным составом "оптикот", который предохранил обработанную поверхность от повреждений при транспортировке и хранении. Затем были сделаны снимки характерных зон на поверхности каждого образца на электронном микроскопе УЭМВ-100К с увеличением $31000\times$ /использован метод реплик/. Условия обработки каждой пары образцов приведены в табли-

це 2.1.

Анализ фотографий показал:

1. Материал образцов имеет поры - рис. 2.10 - 2.12.
2. Хорошо видны царапины от нароста на резце или от стружки - рис. 2.13 - 2.16. Края царапины неровные, металлы выжат в стороны как будто поверхность пропахана плугом.
3. Хорошо видны вмятины и выступы, образованные инородными частицами, попавшими на обработанную поверхность из-за повышенной загрязнённости /запылённости/ помещения, в котором производилось точение образцов - рис. 2.11 - 2.13, 2.16, 2.17.
4. Хорошо различимы следы подачи - рис. 2.12, 2.17.
5. Наилучший результат по шероховатости получен на образце, обработанном резцом № 183 - рис. 2.11.

Если не учитывать дефекты материала, то обработанная поверхность образца на рис. 2.11 имеет шероховатость не более разрешающей способности электронного микроскопа с использованием метода реплик, то есть высота неровностей поверхности не превышает 0,01 мкм /10 нм/.

Для обработки меди, алюминия и его некоторых сплавов /Д16Мп, О1541 и т.п./ наиболее благоприятны следующие значения параметров режущей части инструмента:

- передний угол / γ / - $0...2^\circ$,
- задний угол / α / - $7...10^\circ$,
- угол в плане / φ / - $15...45^\circ$,
- угол наклона главной режущей кромки / λ / - $0...5^\circ$,
- ширина фасетки / β / - 0,3...1,0 мм,
- радиус закругления режущей кромки / ρ / - 0,5...15 мм.

Таблица 2.1

| № пары образцов | № резца /из табл.4.1/ | № рисунка |
|-----------------|-----------------------|------------|
| 1 | 182 | 2.13-2.16 |
| 2 | 183 | 2.10-2.11 |
| 3 | 1521 | 2.12, 2.17 |

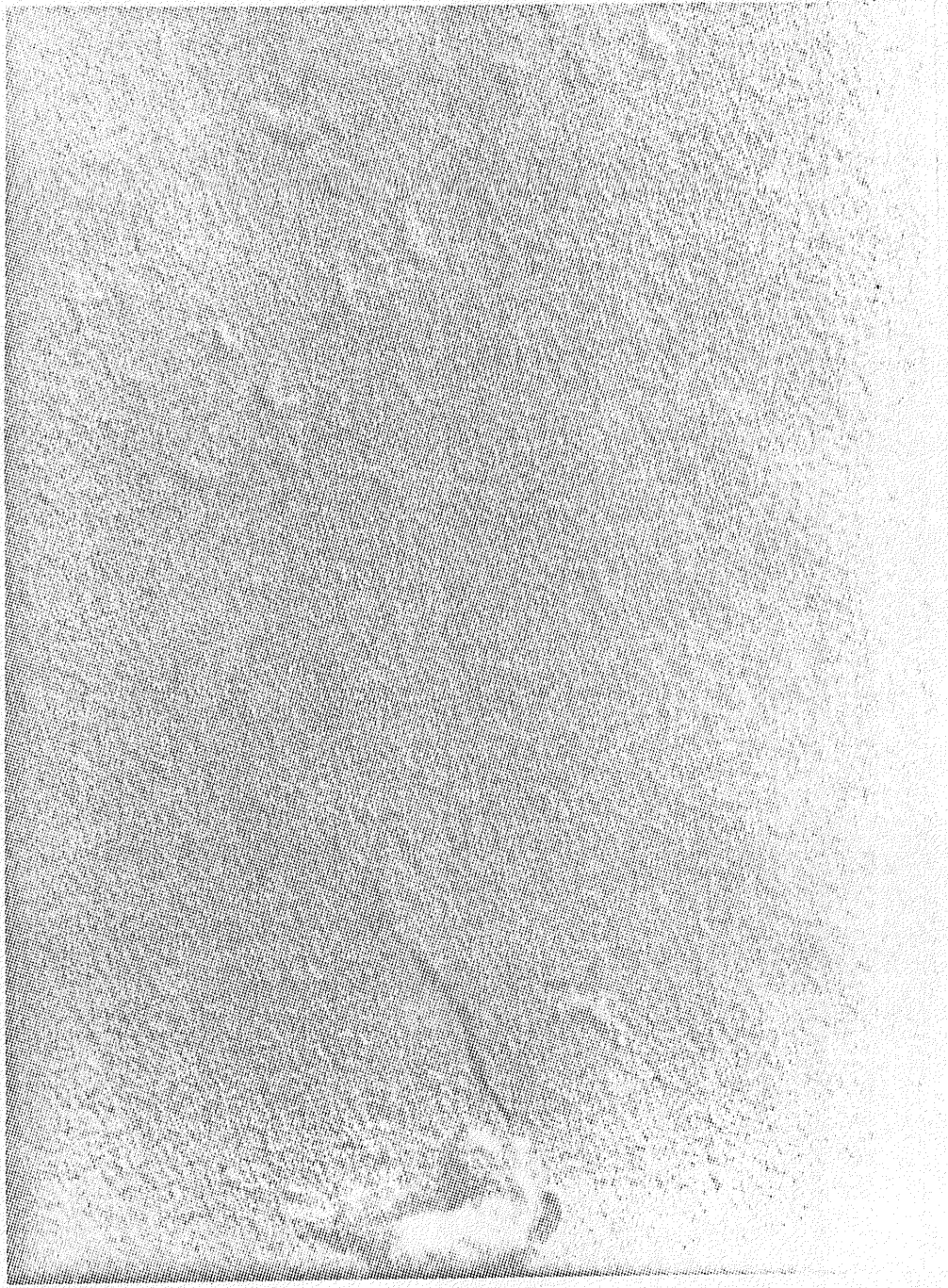
Таблица 2.2

| № п/п | Расстояние от центра детали /место съёмки/, мм | Значение R_z , мкм |
|-------|--|----------------------|
| 1 | 5 | 0,019 |
| 2 | 15-20 | 0,018 |
| 3 | 30-35 | 0,029 |
| 4 | 45-50 | 0,023 |
| 5 | 60-65 | 0,020 |
| 6 | 75-80 | 0,022 |
| 7 | 90-95 | 0,017 |
| 8 | 105-110 | 0,018 |



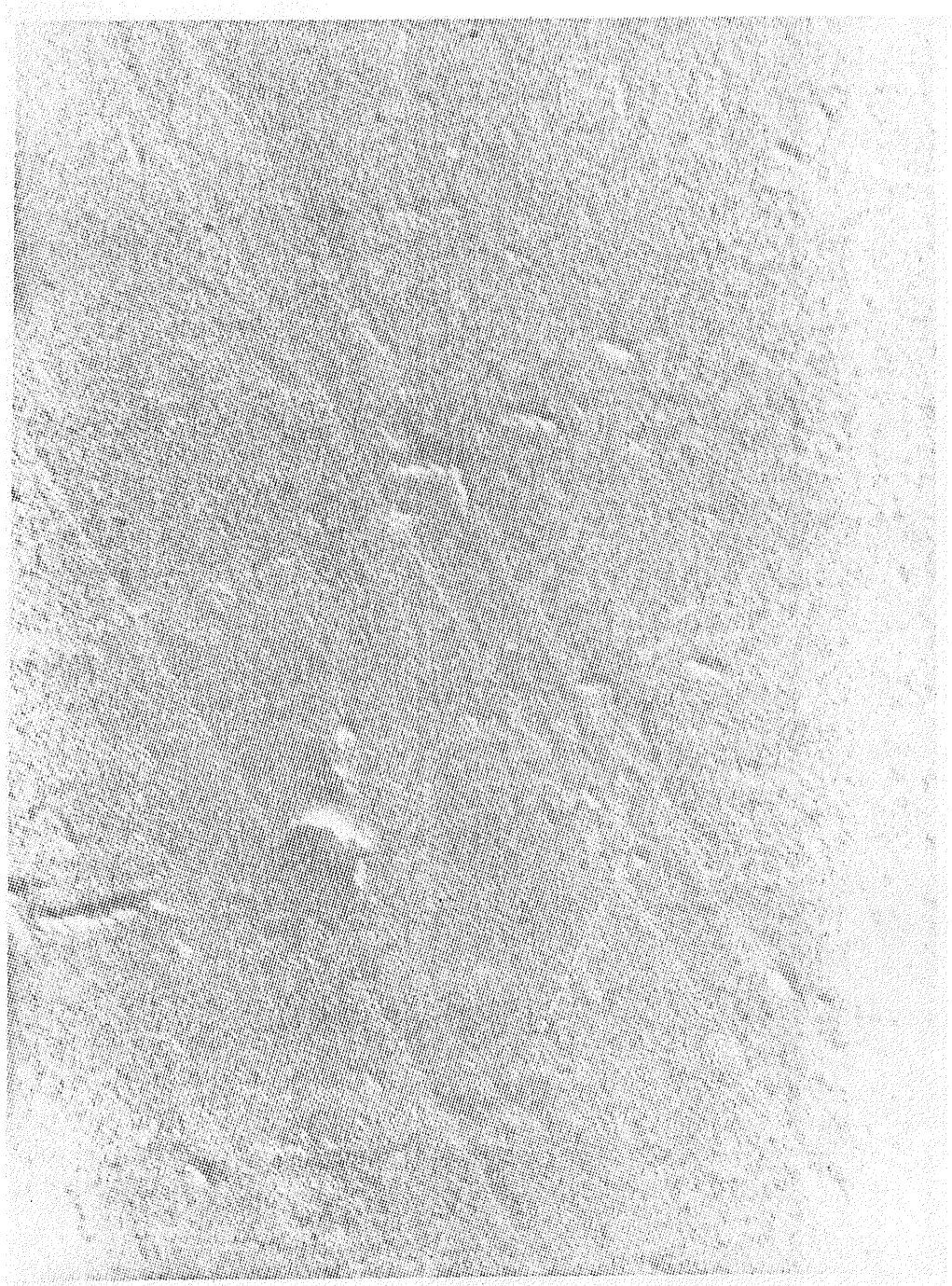
1мкм

Рис. 2.10. Микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МСБ после алмазного точения.



1мкм

Рис. 2.11. Микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МСБ после алмазного точения.



1 мкм

Рис. 2.12. Микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МОБ после алмазного точения.



1 мкм

Рис. 2.13. микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МОБ после алмазного точения.



1 мкм

Рис. 2.14. Микрофотография /31000 \times / поверхности образца из меди МСБ после алмазного точения.



1 мкм

Рис.2.15. Микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МСБ после алмазного точения.



1мкм

Рис. 2.16. Микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МОБ после алмазного точения.



1мкм

Рис.2.17. Микрофотография /31000^x/ поверхности образца из меди МОБ после алмазного точения.

Особое внимание следует обратить на правильный выбор радиуса закругления режущей кромки, так как этот параметр прямо влияет на микронеровности обработанной поверхности. Высота неровностей h , образованных радиусной режущей кромкой определяется выражением /рис. 2.19/:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_0^2}{4}}, \quad / 2.1 /$$

где: S_0 - подача инструмента на один оборот шпинделя.

Если режущая кромка резца имеет прямолинейную форму, то высота неровностей на обработанной поверхности зависит от точности установки режущей кромки параллельно касательной к траектории движения инструмента и достаточно точно определяется следующим выражением /рис. 2.19/:

$$h \approx S_0 \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad / 2.2 /$$

где: θ - угол между режущей кромкой резца и касательной к траектории его движения.

Применение резцов с радиусной заточкой значительно уменьшает время наладки станка на достижение требуемой шероховатости поскольку при этом не требуется точной установки режущей кромки относительно траектории движения суппорта. Однако, в этом случае накладываются некоторые ограничения /2.1/ на значение оборотной подачи и, следовательно, производительности. Кроме того, при обработке резцом с радиусной заточкой из-за большей ширины среза при одних и тех же условиях возникает большее усилие от-

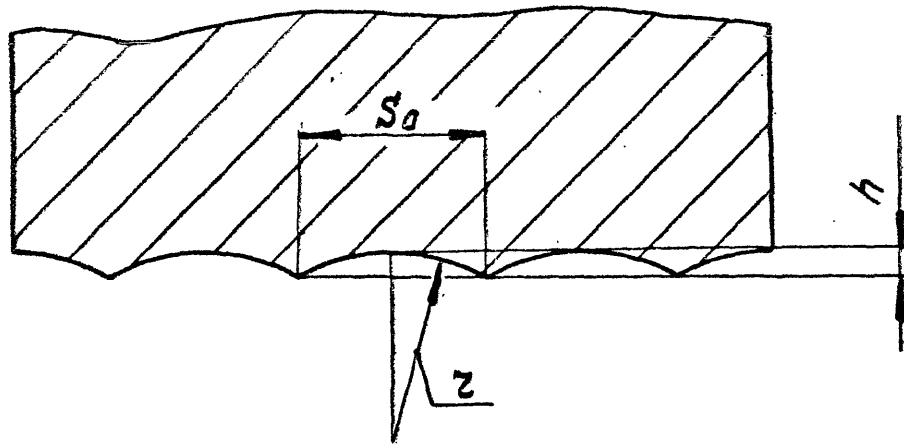


Рис.2.18. Профиль поверхности, обработанной резцом с радиусной режущей кромкой.

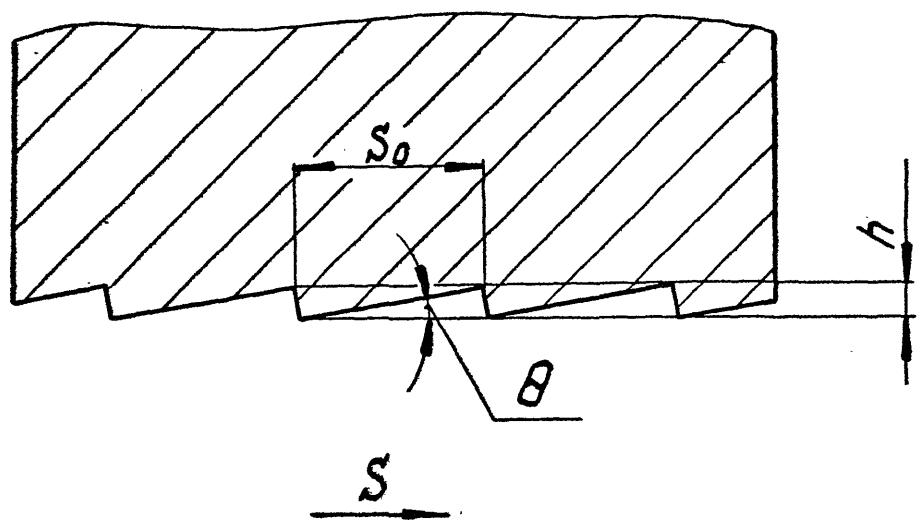


Рис.2.19. Профиль поверхности, обработанной резцом с прямолинейной режущей кромкой.

жима резца и для обработки этими резцами необходим станок с более жёсткой системой ШИД. Поэтому в каждом конкретном случае обработки ОГ поверхности следует проводить анализ целесообразности использования резца с радиусной или прямолинейной режущей кромкой.

2.2. ИЗДЕЛИЕ

Для создания благоприятных условий резания обрабатываемый материал должен иметь однородную структуру и физико-механические свойства. Особо важно отсутствие инородных включений, пор, раковин и тому подобных дефектов, так как, например, наличие даже одного твёрдого включения в обрабатываемом материале достаточно для образования скола на режущей кромке резца. Это объясняется тем, что обработка производится, как правило, с большими скоростями резания /порядка сотен и тысяч метров в минуту/ и при встрече с твёрдым включением режущая кромка подвергается значительному ударному воздействию. Вследствие того, что режущая кромка имеет очень маленький радиус округления и алмаз по своей природе очень хрупкий материал, в месте удара происходит выкрашивание режущей кромки.

Внутренние напряжения в материале должны быть сведены к минимуму методами термического воздействия. Большое значение для обеспечения точности формы /отклонения формы и волнистости/ имеют деформации от:

Г. Внутренних напряжений, возникающих на операциях, предшествующих алмазному точению. Например, для основы диска памяти ЭВМ предварительную обработку торцев пред-

почтительнее осуществлять алмазным резцом на шапющих режимах резания: глубина резания - 0,05...0,1 мм; подача - 0,05...0,1 мм/об; частота вращения шпинделя - 1000...1500 об/мин. Если же предварительная обработка производится в более тяжёлых условиях, то в материале детали возникают значительные внутренние напряжения, которые вызывают коробление диска.

2. Неточность формы и размера базовых поверхностей для установки в зажимном приспособлении станка. Опытным путём установлено, что на предварительных операциях неплоскостность диска должна быть не более 0,05 мм, а разнотолщинность не более 0,02 мм. В этом случае обеспечивается зажим детали в вакуумном патроне с обеспечением выходных параметров точности после финишного алмазного точения. Наилучшие результаты получаются, когда предварительная обработка обеспечивает разнотолщинность не более 0,001 мм.

3. Конструктивных неоднородностей в зоне ОТ поверхности. Часто металлические зеркала выполняются сборными из нескольких отдельных частей, причём, рабочая поверхность выполняется из тонкого листа припаянного к основе, имеющей сложную конструктивную структуру. Поэтому важно, чтобы влияние этих неоднородностей было уменьшено. Это осуществляется путём уменьшения размера ячеек, равномерного их распределения по всей поверхности прилегания и обязательной термической обработки для снятия внутренних напряжений.

4. Сил инерции. При больших скоростях движения во время

обработки действуют значительные силы инерции, которые деформируют поверхностный слой обрабатываемой детали и это приводит к дополнительным погрешностям формы. Например, деталь из меди М0Б диаметром 250 мм толщиной 60 мм при частоте вращения шпинделя 2000 об/мин имела деформацию поверхностного слоя от сил инерции порядка 0,0015 мм.

5. Силы гравитации. Если обрабатываемое изделие имеет относительно нежесткое сечение, то возможны значительные деформации от собственного веса изделия. Например, стальной вал диаметром 40 мм и длиной 300 мм при консольном креплении прогибается от собственного веса на 2 мм. Поэтому при проектировании изделий с ОГ поверхностями необходимо всегда учитывать деформации от сил гравитации.

6. Изменения температуры. Недопустимо производить обработку на режимах, приводящих к нагреву детали, так как нагрев на 1°С детали из меди диаметром 100 мм и толщиной 100 мм приводит к изменению линейных размеров на 1,7 мкм.

2.3. РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ

Общезвестно, что режимы резания оказывают значительное влияние на точность обработанной поверхности и особенно сильное влияние на шероховатость. В литературе даются противоречивые рекомендации по режимам резания для финишной обработки цветных металлов и их сплавов алмазными резцами. Поэтому при разработке станка для алмазного точения ОГ поверхностей одними из первых возникают вопро-

сы о допустимом диапазоне скоростей резания, подач, о допустимой глубине резания.

При обработке торцовых поверхностей особой точности наиболее важно определить допустимый диапазон скорости резания, так как с приближением к оси вращения шпинделя скорость резания уменьшается /если частота вращения шпинделя постоянна/ и в пределе стремится к нулю.

Большинство известных рекомендаций по скорости резания сводятся к максимальному её увеличению /для цветных металлов и их сплавов - 500...2000 м/мин/. Такая направленность очевидно объясняется тем, что все эти рекомендации справедливы для оборудования, на котором производились исследования с целью выявления наиболее благоприятных режимов резания алмазными резцами. Для этого использовались, как правило, станки с традиционными высокоточными опорами шпинделя /опорами качения, гидродинамическими опорами/ и с приводом шпинделя через плоскостороннюю передачу - например, станки фирмы "Bolley" /ФРГ/. Вышеуказанные станки имеют наилучшие динамические характеристики при больших частотах вращения шпинделя, когда инерционные силы преобладают над возмущающими силами и стабилизируют положение оси шпинделя. Однако в нормативной документации по режимам резания не оговариваются требования к оборудованию для финишной обработки, а это исключительно важный момент при алмазном точении ОГ поверхностей.

Учитывая вышесказанное можно предположить, что для особо точных станков, предназначенных для алмазного точения ОГ поверхностей допустимый диапазон скоростей резания

будет несколько иной. Впервые определение допустимого диапазона скоростей резания было произведено на опытном стенде на базе станка мод. I6B20A /рис. I.5/ - на образце из меди МОБ диаметром 300 мм с отверстием в центре 6 мм - скорость резания изменялась в диапазоне от 942 м/мин до 18,8 м/мин /шероховатость всей торцовой поверхности R_z менее 0,05 мкм/, а затем на станке мод. МК 65I3 на образце из меди МОБ диаметром 250 мм - скорость резания изменялась в диапазоне от 1730 м/мин до 0,005 м/мин /шероховатость поверхности практически не изменялась - см. таблицу 2.2. и профиллограмму рис. 2.9/. Аналогичные результаты были получены при алмазном точении специальных алюминиевых сплавов Д16МП и О1541.

Таким образом установлено, что при тонком алмазном точении некоторых цветных металлов и их сплавов на станках, предназначенных для обработки ОГ поверхностей скорость резания не оказывает существенного влияния на шероховатость обработанной поверхности, даже при обработке с R_z менее 0,025 мкм.

Величина подачи, как указывалось выше, тесно связана с одной стороны с точностью установки режущей кромки или радиусом закругления режущей кромки, а с другой стороны с производительностью обработки. Теоретический анализ и практический опыт показывают, что наиболее употребительны при алмазном точении ОГ поверхностей подачи от 3 мкм/об до 50 мкм/об. Причём меньшие подачи применяют при точении резцами с радиусной заточкой, а большие - с прямолинейной режущей кромкой.

Глубина резания во многом определяет состояние поверхностного слоя обработанной детали - степень концентрации в нём напряжений. С уменьшением глубины резания уменьшаются напряжения в поверхностном слое. Для тонких деталей /например, основа диска памяти ЭВМ/ увеличение поверхностных напряжений приводит к недопустимо большому короблению. Для оптических поверхностей увеличение поверхностных напряжений снижает ресурс работы этих поверхностей.

Опыт эксплуатации станков мод. МК 6511, МК 6512, МК 6513 показал, что для алмазного точения основы диска памяти ЭВМ глубина резания должна быть не более 25 мкм, а для оптических ОГ поверхностей - не более 5 мкм.

Поскольку радиус округления режущей кромки алмазного резца имеет величину порядка 0,025 мкм, минимальная глубина резания может быть не менее 0,075...0,1 мкм. Таким образом станки для алмазного точения ОГ поверхностей необходимо оснащать устройством, обеспечивающим врезание на глубину резания 0,1 мкм.

2.4. СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩАЯ ЖИДКОСТЬ

Обработка без применения смазочно-охлаждающей жидкости /СОЖ/ приводит к образованию нароста на режущей кромке, который оставляет царапины на обработанной поверхности. При использовании в качестве СОЖ спирта-ректификата наблюдается прилипание стружки к передней поверхности резца, которая как и нарост повреждает обработанную поверхность. Наиболее эффективными охлаждающими и

смазывающими свойствами обладает денатурированный спирт.

Для полного использования свойств денатурированного спирта как СОЖ его необходимо подавать в зону резания в виде тумана с помощью специального распылителя. Замечено, что даже короткий перерыв в подаче СОЖ в зону резания может привести к образованию нароста на режущей кромке. Поэтому очень важно обеспечить стабильную подачу СОЖ в зону резания.

СОЖ, как правило, подаётся в зону резания через трубку малого диаметра /1...2 мм/ в непосредственной близости от режущей кромки, а струя воздуха, распыляющая СОЖ сдувает вонь образуемую стружку с режущей кромки резца и создаёт благоприятные условия для её удаления специальным отсасывающим устройством.

2.5. УДАЛЕНИЕ СТРУЖКИ

Если стружка с достаточно большой скоростью падает на обработанную поверхность или попадает между резцом и обработанной поверхностью, то она неизбежно повреждает последнюю. Поэтому принудительное удаление стружки из зоны резания и от обработанной поверхности является необходимым элементом рассматриваемого технологического процесса.

При алмазном точении ОП поверхностей образуется стружка преимущественно в виде лёгкой ленты сечением 25...250 мкм² и частично в виде пыли. Скорость образования и скода стружки /например, в случае обработки торцовой поверхности/ изменяется в широких пределах - от нескольких тысяч метров в минуту у периферии детали до нескольких милл-

лиметров в минуту в центре. Кроме этого в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности существуют сильные воздушные потоки создаваемые быстрым вращением шпинделя с закреплённой на нём деталью.

Таким образом, стружка подвергается сразу нескольким воздействиям: переменному по величине и направлению усилию схода стружки, переменному по величине и направлению воздействию увлекаемых воздушных потоков у поверхности детали, воздействию струи воздуха из распылителя и воздействию потока воздуха, засасываемого раструбом устройства удаления стружки. Всё это вызывает большие трудности в создании эффективной системы удаления стружки.

В некоторых случаях /рис. 1.6/ если ход суппорта не превышает 100 мм, большой заборный раструб устанавливается непосредственно на жёстком основании у края обрабатываемой детали. При этом необходимо довольно мощное /порядка 3 кВт/ отсасывающее устройство, которое служит дополнительным источником колебаний и требует дополнительных затрат на виброизоляцию. А удаление стружки всё же происходит не всегда эффективно из-за большого расстояния от зоны резания до заборного раструба.

Более рационально использовать маломощное /порядка 0,5 кВт/ отсасывающее устройство /рис. 1.7/, а заборный раструб расположить на суппорте в непосредственной близости от зоны резания с тем, чтобы уменьшить границы изменения переменных воздействий и повысить эффективность удаления стружки. В этом случае особое внимание необходимо уделить конструкции соединения заборного раструба с отсасывающим устрой-

ством, с тем, чтобы исключить передачу вибрации на суппорт. В первом приближении эта цель достигается при выполнении соединения гибким шлангом, однако, более полно задача решается при соединении в виде телескопической трубы с расчётным гарантированным зазором.

2.6. ПОМЕЩЕНИЕ

В помещении для эксплуатации станков, обрабатывающих ОГ поверхности необходимо создать специальные условия, обеспечивающие работоспособность станков и стабильность выхода годной продукции.

Фундамент под станок, изолированный от элементов строительных конструкций помещения, должен обеспечивать изоляцию от внешних колебаний. Недопустимо расположение вблизи помещения энергичных источников колебаний /молотов, штампов, прессов и т.п. оборудования, железнодорожных, трамвайных линий и т.д./, так как фундамент в сочетании с пневматическими виброизолирующими опорами обеспечивает эффективную изоляцию от маломощных источников колебаний, а отдельные энергичные удары эффективно погасить не может.

Системы обеспечения технологического микроклимата должны располагаться вне помещения и иметь активную виброизоляцию.

В связи с тем, что станок установлен на пневматические виброизолирующие опоры, которые имеют низкую жёсткость, на качество обработки оказывают влияние звуковые колебания среды в помещении. Поэтому во время обработки помещение должно быть звукоизолировано.

Температурный режим в помещении имеет очень большое значение. Так как обычно шпиндель станка изготавливают из высоколегированной стали, а втулку из бронзы, и коэффициенты температурного расширения этих материалов имеют отношение 1:1,7, то при значительном изменении температуры нарушаются исходные зазоры /7...15 мкм/ в аэростатических опорах шпинделя. А при сильном охлаждении /до 10°С/ возможно схватывание шпинделя втулкой. Кроме этого, при обработке ОГ поверхностей с точностью формы соизмеримой с одной угловой секундой /1мкм на длине 200 мм/ даже незначительные температурные деформации базовых деталей станка могут привести к нарушению первоначальной точности траекторий движения исполнительных органов и их взаимного расположения. Поэтому, в первом приближении для станка предназначенного для обработки деталей диаметром до 500 мм необходимо поддерживать температуру в помещении с точностью $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Относительная влажность в помещении должна быть такой, чтобы исключить коррозию направляющих станка и обработанной поверхности изделия.

Недопустимо присутствие в воздушной среде помещения частиц, твердость которых превосходит твердость материала втулок аэростатических опор или твердость обрабатываемого материала. Попадание этих частиц в рабочий зазор аэростатических опор шпинделя и суппорта приводит к нарушению их работоспособности, а при попадании между резцом и обрабатываемой поверхностью образуется скол на режущей кромке резца.

Сжатый воздух, подаваемый в пневмосистему станка должен быть тщательно очищен и иметь температуру, отличающуюся от температуры помещения не более 1°C . Технологические жидкости /например, СОЖ/ должны также иметь температуру помещения и подвергаться тщательной очистке от инородных примесей.

2.7. ПЕРСОНАЛ

Если сравнивать рассматриваемый метод обработки ОГ поверхностей с методом абразивной алмазной обработки, то удельный вес влияния обслуживающего персонала на параметры точности обработанной поверхности при обработке лезвийным инструментом значительно меньше. Это объясняется тем, что формообразование обработанной поверхности обеспечивается в основном настройкой станка, а не исключительно искусством рабочего и тем, что значительно уменьшается время собственно механической обработки /от нескольких дней и недель до нескольких минут и часов/.

Однако, влияние подготовленности обслуживающего персонала в обработке ОГ поверхностей методом алмазного точения имеет большое значение. Успешную эксплуатацию станков для алмазного точения ОГ поверхностей обеспечит обслуживающий персонал, который имеет по крайней мере среднее техническое образование с изучением особенностей алмазного точения ОГ поверхностей по следующим вопросам:

1. Свойства цветных металлов и их сплавов.
2. Свойства натурального алмаза.
3. Конструкция, технология изготовления и геометрия режу-

щей части алмазного лезвийного инструмента.

4. Режимы резания.
5. Конструкция станков.
6. Пневмооборудование, гидрооборудование, электрооборудование.
7. Приборы /контроль шероховатости и формы обработанной поверхности, балансировка, специальные оптические устройства/.
8. Помещение.

Поскольку число факторов, оказывающих влияние на параметры точности ОГ поверхности велико /порядка нескольких десятков/, а сочетаний одновременного действия нескольких из них ещё больше, способность обслуживающего персонала к анализу полученных результатов обработки и выбору правильных мер для достижения требуемого качества обработки приобретает самостоятельное значение и является обязательной. Как уже отмечалось, технологический процесс обработки ОГ поверхности очень чувствителен к малейшим отклонениям от требуемых условий. Однако, если обслуживающий персонал аккуратно выполняет все операции и переходы, внимательно контролирует результаты своей работы и терпеливо /без спешки и срывов/ определяет причины возникающих отклонений от требуемых условий обработки, то он уверенно достигнет высокого качества обработки ОГ поверхности.

При работе на станке необходимо различать мельчайшие дефекты на обработанной поверхности, чрезвычайно точно устанавливать резец /особенно при обработке торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом/. С целью упро-

щения выполнения этих операций станок и рабочее место оснащаются целым рядом оптических устройств /например, микроскопом, микроинтерферометром МИИ-4, интерферометром ИГ-200, оптическим отсчётным устройством и т.п./, для работы с которыми необходимо хорошее зрение.

Из-за высокой чувствительности системы "станок-виброизолирующие опоры" недопустимо прикосновение обслуживающего персонала к станку во время точения ОГ поверхности, так как это может привести к образованию дефекта на обработанной поверхности в виде риски. Недопустимо также громко разговаривать, кричать, хлопать дверьми, стучать и т.п. около станка во время точения. Для получения наивысшей точности обработки необходимо учитывать, что при прикосновении персонала к обрабатываемой детали изменяется её температура и это может приводить к значительным деформациям.

2.8. СТАНОК

2.8.1. ПАРАМЕТРЫ ТОЧНОСТИ СТАНКА

В наиболее общем виде параметры точности станка можно разбить на пять групп [7] :

1. Параметры, определяющие точность базовых поверхностей для установки заготовки и инструмента.
2. Параметры, определяющие точность воспроизведения траектории движения исполнительных органов.
3. Параметры, определяющие точность взаимного расположения траекторий движения исполнительных органов.
4. Параметры, определяющие точность взаимосвязанных относительных перемещений исполнительных органов во время обработки.
5. Параметры, определяющие точность позиционирования исполнительных органов.

Известно [13] , [17] , [37] , что на каждую группу параметров точности станка и на все вместе оказывают влияние кинематические, статические, динамические, температурные и временные погрешности элементов станка, которые в свою очередь могут быть систематическими и случайными.

В каждом конкретном случае создания того или иного станка решается вопрос о достижении требуемых параметров точности станка оптимальными средствами с учётом реальных условий производства на данном предприятии. Поэтому реальные конструктивные решения в станках, созданных на основе настоящей работы, выполнены с учётом условий про-

изводства на Московском станкостроительном заводе "Красный пролетарий".

Так как требования к параметрам точности станка для алмазного точения 0Γ поверхностей чрезвычайно высоки автор при разработке станков руководствовался следующими принципами:

1. Способ образования 0Γ поверхности должен иметь наименьшее возможное число движений.
2. Быстродвижущиеся элементы / например, шпиндель изделия / должны быть максимально сосредоточены для уменьшения динамического момента. Чем система проще, тем она ближе к линейным колебательным системам, которые легче исследуются и поддаются настройке. Кроме этого, простые системы как правило стационарны, то есть не изменяют своих свойств во времени.
3. Детали, определяющие параметры точности станка должны иметь симметричную и по возможности простую конструкцию.
4. Конструкции отдельных узлов и станка в целом должны быть предельно просты с минимально необходимым количеством стыков и подвижных элементов.
5. Главный привод и привод подач должны оказывать минимальное тепловое воздействие на детали, определяющие параметры точности станка.
6. Для максимального снижения амплитуды вынужденных относительных колебаний /здесь и далее относительные колебания есть относительные колебания между режущей кромкой инструмента и обработанной поверхностью из-

цели/ необходимо:

- все вспомогательные узлы, обеспечивающие работоспособность станка и не имеющие жёсткой связи с ним располагать вне станка;
- обеспечить эффективную изоляцию станка от источников колебаний, расположенных вне станка;
- обеспечить максимальное снижение амплитуды возмущающих колебаний источников колебаний, расположенных непосредственно на станке;
- обеспечить максимально возможную статическую и динамическую жёсткость системы СПИД;
- обеспечить максимально возможное демпфирование энергии колебаний в системе СПИД.

2.8.2. ВЫНУЖДЕННЫЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Как показывают проведённые исследования и опыт [17], [18], [28], [29] в большинстве случаев при тонком алмазном точении цветных металлов и их сплавов усилие резания не вносит заметных изменений в поведении упругой системы станка в сравнении с холостым ходом. Поэтому анализ вынужденных относительных колебаний холостого хода между резцедержателем и шпинделем изделия даёт возможность с одной стороны определить ожидаемую точность обработки, а с другой стороны выявить источники вынужденных относительных колебаний, оказывающих наибольшее влияние на тот или иной параметр точности обработанной поверхности.

Если исключить влияние технологических факторов,

рассмотренных в п.п. 2.1...2.7 и параметров точности станка, определяющих точность базовых поверхностей для установки заготовки и инструмента и точность позиционирования исполнительных органов, то параметры точности обработанной поверхности определяются вынужденными относительными колебаниями холостого хода между режущей кромкой инструмента и обработанной поверхностью изделия.

Обозначим:

$A_{отн}$ - амплитуда относительных колебаний, мм;

$T_{отн} = \frac{1}{f_{отн}}$ - период относительных колебаний, сек;

S_c - подача режущего инструмента, мм/сек;

l - базовая длина при определении шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73, мм;

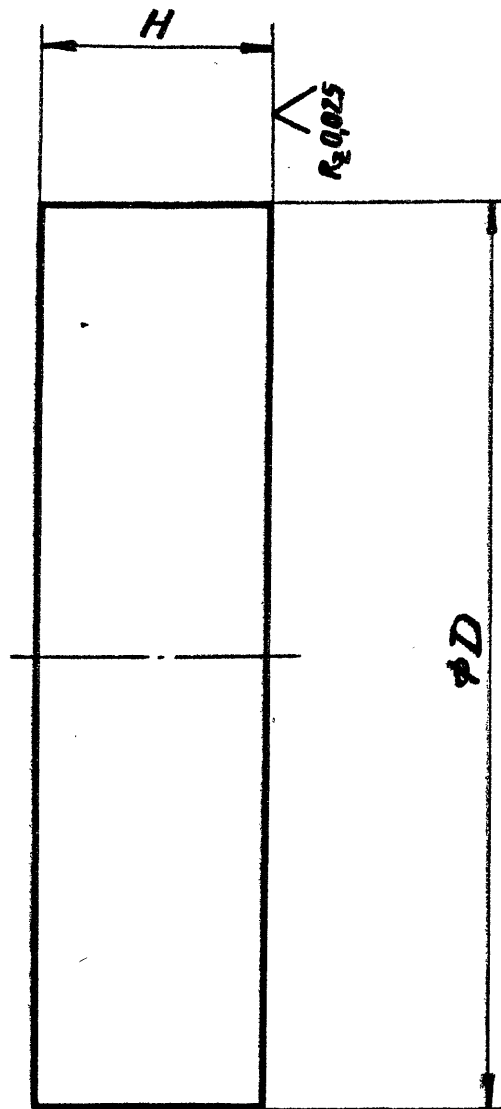
l_1 - базовая длина при определении местной ошибки, мм;

L - линейный размер обработанной поверхности изделия, мм.

Рассмотрим точнее плоской торцовой ОТ поверхности /рис.2.20/. В этом случае рельеф обработанной поверхности образован спиралью Архимеда с шагом равным подаче инструмента на один оборот шпинделя изделия, а структуру рельефа обработанной поверхности, измеренного вдоль траектории движения инструмента можно разбить на три частотных диапазона:

1. Когда $T_{отн} < \frac{l}{S_c}$ - относительные колебания оказывают влияние на шероховатость обработанной поверхности.

2. Когда $\frac{l}{S_c} < T_{отн} < \frac{l_1}{S_c}$ - относительные колебания оказывают влияние на местное отклонение формы /волнистость/ обработанной поверхности.



- 1. Отклонение формы на $\phi 250$ мм не более - 1 мкм.*
- 2. Местное отклонение формы (волнистость) на длине 25 мм не более - 0,1 мкм.*

Рис.2.20. Деталь с плоской $\sigma\Gamma$ поверхностью.

3. Когда $\frac{\ell_1}{S_c} < T_{отн} < \frac{L}{S_c}$ - относительные колебания оказывают влияние на отклонение формы обработанной поверхности.

Вышеуказанное деление частотного спектра относительных колебаний достаточно условно из-за условности разделения неровностей поверхности на шероховатость, волнистость и отклонение формы. Несмотря на это оно облегчает анализ получаемых результатов и аттестацию обработанной поверхности.

По ГОСТ 2789-73 параметр шероховатости R_z определяется как среднее расстояние между находящимися в пределах базовой длины пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии. Следовательно, если относительные колебания имеют постоянную амплитуду, то наибольшая величина параметра R_z получится при условии что:

$$T_{отн} \leq \frac{1}{5} \cdot \frac{\ell}{S_c}.$$

Учитывая, что для ОГ поверхностей базовая длина $\ell = 0,08$ мм, а обработка ведётся с подачами $S_c = 0,05 \dots 0,5$ мм/сек, период допустимых относительных колебаний должен быть не более $0,32 \dots 0,032$ сек, то есть частота относительных колебаний:

$$f_{отн} \geq 3,125 \dots 31,25 \text{ Гц}.$$

Аналогично рассчитываются интервалы частот относи-

тельных колебаний, оказывающих влияние на волнистость и отклонение формы обработанной поверхности.

Таким образом, для обработки детали, изображённой на рис. 2.20 необходимо обеспечить следующий амплитудно-частотный спектр относительных колебаний:

1. По шероховатости - $A_{отн} \leq 0,025$ мкм при $f_{отн} \geq 3 \dots 30$ гц.
2. По волнистости - $A_{отн} \leq 0,1$ мкм при $3 \dots 30$ гц $\geq f_{отн} \geq 2 \times 10^{-3} \dots 2 \times 10^{-2}$ гц.
3. По отклонению формы - $A_{отн} \leq 1$ мкм при $2 \times 10^{-3} \dots 2 \times 10^{-2}$ гц $\geq f_{отн} \geq 2 \times 10^{-4} \dots 2 \times 10^{-3}$ гц.

Из анализа видно, что наибольшую трудность в достижении необходимой точности обработки представляет достижение требуемой шероховатости, так как для этого параметра точности амплитуда относительных колебаний имеет наименьшее значение.

Если при разработке станка руководствоваться принципами, изложенными в п. 2.8.1, то амплитуда относительных колебаний, оказывающих влияние на шероховатость обработанной поверхности определяется следующими основными составляющими:

1. От неточности опор исполнительных органов /шпинделя и суппорта/.
2. От приводов исполнительных органов /шпинделя и суппорта/.
3. От остаточной неуравновешенности вращающихся элементов шпиндельного узла.
4. От источников колебаний, расположенных вне станка.

Поскольку для обработки O_1 поверхности амплитуда вынужденных относительных колебаний должна быть не более 0,025 мкм, то в первом приближении её составляющие должны быть не более 0,005 мкм /5 нм/.

2.8.3. ОПОРЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

В настоящее время известны [20], [22], [37] опоры следующих видов:

1. Контактные опоры:

- скольжения /сухого и смешанного трения/.
- качения /шариковые и роликовые/.

2. Контакт-бесконтактные опоры:

- гидродинамические,
- аэродинамические.

3. Бесконтактные опоры:

- гидростатические,
- аэростатические,
- магнитные.

Какие же опоры необходимо использовать, чтобы обеспечить неточность положения шпинделя и подвижной части суппорта во время обработки не более 5 нм?

Очевидно, что контактные опоры в этом случае должны быть собраны из элементов, имеющих точность формы рабочих поверхностей в несколько нанометров. В настоящее время наилучшие контактные опоры состоят из элементов, имеющих точность в несколько десятков и сотен нанометров. Таким образом, для изготовления контактных опор требуемой точности необходимо повысить точность

изготовления элементов этих опор на один-два порядка. Кроме этого из-за механического контакта в этих опорах неизбежна сравнительно быстрая потеря первоначальной точности вследствие износа.

Более высокую точность положения шпинделя и подвижной части суппорта при использовании относительно неточных элементов обеспечивают контактно-бесконтактные опоры, в которых между подвижным и неподвижным элементами находится жидкая или газообразная среда, способствующая усреднению погрешностей формы элементов опоры. Однако в периоды разгона и торможения контактно-бесконтактные опоры подвержены износу и также как и контактные опоры со временем теряют первоначальную точность. Вместе с этим, при изменении скорости скольжения подвижного элемента опоры относительно неподвижного происходит смещение подвижного элемента по нормали к опорной поверхности. Особенно сильно этот эффект проявляется при малых скоростях скольжения /когда производится контроль точности шпиндельного узла и в диапазоне рабочих подач суппорта/. Известны также явления потери устойчивости в этих опорах — полускоростной вихрь.

Бесконтактные опоры имеют практически неограниченный срок службы с сохранением исходных параметров точности, так как, например, при вращении шпинделя не происходит непосредственного контакта в опорах во всём диапазоне скоростей скольжения.

Свойство бесконтактных опор усреднять погрешности формы составных элементов позволяет обеспечить требуе-

мую точность положения подвижного элемента при относительно небольших затратах. Например, если для гидростатической опоры [37] зазор между элементами опоры 30 мкм, а допустимое смещение подвижного элемента 0,005 мкм, то погрешность формы элементов опоры не должна превышать величины 0,275 мкм.

Следует отметить существенное различие между гидростатическими и аэростатическими опорами шпинделя. Вследствии более высокой вязкости среды в гидростатической опоре /вязкость масла "И-20А" ГОСТ 20799-75 больше вязкости воздуха в 2000 раз/ при вращении быстроходного шпинделя неизбежны значительные потери на трение, что приводит к излишнему нагреву шпиндельного узла и, следовательно, к температурным деформациям. Не менее важно и то, что значительные потери на трение вынуждают использовать более мощный двигатель для привода шпинделя во время резания. Например, при вращении шпинделя диаметром 80 мм на холостом ходу с частотой 2000 об/мин и смазкой маслом "И-5" потребляется мощность 1125 Вт [1]. Это последнее обстоятельство приводит к передаче на шпиндель от привода возмущений с большей энергией при прочих равных условиях и практически исключает возможность использования инерционного привода. Немаловажным фактором является наличие утечек масла, свойственных гидростатическим опорам, которые значительно ухудшают условия эксплуатации станка.

В настоящее время пока ещё не сложились условия для использования магнитных [20] опор в станкострое-

нии, хотя их свойства весьма заманчивы для прецизионных станков, особенно камерных станков, когда необходимо обеспечить обработку изделия в вакууме.

Таким образом, в настоящее время наиболее приемлемыми опорами для шпинделя и суппорта станка для алмазного точения 0Γ поверхностей являются аэростатические опоры, обладающие следующими положительными свойствами:

1. Обеспечивают высокую точность положения подвижного элемента относительно неподвижного во всём диапазоне скоростей скольжения.
2. Имеют практически неограниченный срок службы с сохранением первоначальной точности.
3. Имеют незначительные потери на вязкое трение и как результат отсутствие тепловыделений в опоре. В некоторых случаях /при большом расходе воздуха/ наблюдается даже охлаждение опор воздухом, прокачиваемым через опору.
4. Допускают изготовление элементов опор с относительно невысокой точностью /в сравнении с контактными опорами/.

При проектировании станка для алмазного точения 0Γ поверхностей необходимо учитывать также следующие особенности аэростатических опор:

1. Сравнительно низкая несущая способность и жёсткость, так как обычно для питания опор используется сжатый воздух с давлением $0,4 \dots 0,5$ МПа, в то время как в гидростатические опоры подаётся масло под давлением $2,0 \dots 2,5$ МПа.

2. Отсутствие эффективных демпфирующих свойств в сравнении с гидростатическими опорами, имеющими более вязкую рабочую среду.

Известны аэростатические опоры трёх видов:

1. С сосредоточенным подводом питания /жиклёрные/.
2. С частично распределённым подводом питания /жиклёрные с микроканавками/.
3. С распределённым подводом питания /щелевые, ступенчатые и т.п./.

С точки зрения достижения наивысшей точности траектории движения исполнительного органа наиболее предпочтительны опоры с распределённым подводом питания.

2.8.4. ПРИВОДЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

В связи с тем, что исполнительные органы станка, предназначенного для обработки ОГ поверхностей, должны иметь бесконтактные опоры с весьма низким коэффициентом трения, особенно большое внимание необходимо уделять приводу исполнительных органов. Причём в целом ряде случаев привод исполнительного органа и его опоры настолько тесно взаимосвязаны, что возникла необходимость в новом термине "опорно-приводной узел", который подчёркивает эту взаимосвязь.

При разработке станков для алмазного точения ОГ поверхностей был создан целый ряд опорно-приводных узлов [14], [26], [27], [34], [43] под руководством М.А.Шимановича.

На исполнительный орган с одной стороны воздейст-

вуют источники энергии движения /здесь и далее под энергией движения следует понимать энергию необходимую для осуществления движения/, а с другой стороны - потребители энергии движения. На рис. 2.21 и 2.22 показаны возможные источники и потребители энергии движения исполнительного органа станка для алмазного точения σ поверхностей.

Среди указанных источников энергии движения с точки зрения обеспечения наивысшей точности траектории движения исполнительного органа наилучшими характеристиками обладают источники конечного количества энергии /аккумуляторы/, так как в сравнении с источниками бесконечно большого количества энергии у них нет возмущений, вызываемых колебаниями параметров сети. Правда аккумуляторам присуще свойство постоянного уменьшения энергии заряда в процессе работы. Однако в некоторых случаях энергии аккумулятора вполне достаточно для осуществления процесса обработки σ поверхности.

Например, шпиндель станка мод. МК6513 с планшайбой и обрабатываемой деталью /наружный диаметр 250 мм, высота 60 мм, материал - медь/ имеет время свободного выбега с 2200 об/мин до 1500 об/мин - 60 сек. При точении торцевой σ поверхности этой детали с глубиной резания 0,005 мм и подачей 62 мм/мин частота вращения шпинделя изменяется в пределах от 1500 об/мин до 1000 об/мин за 114 сек.

В станке для алмазного точения σ поверхностей особое значение имеет соединение источника энергии движения с исполнительным органом, так как от совершенства кон-

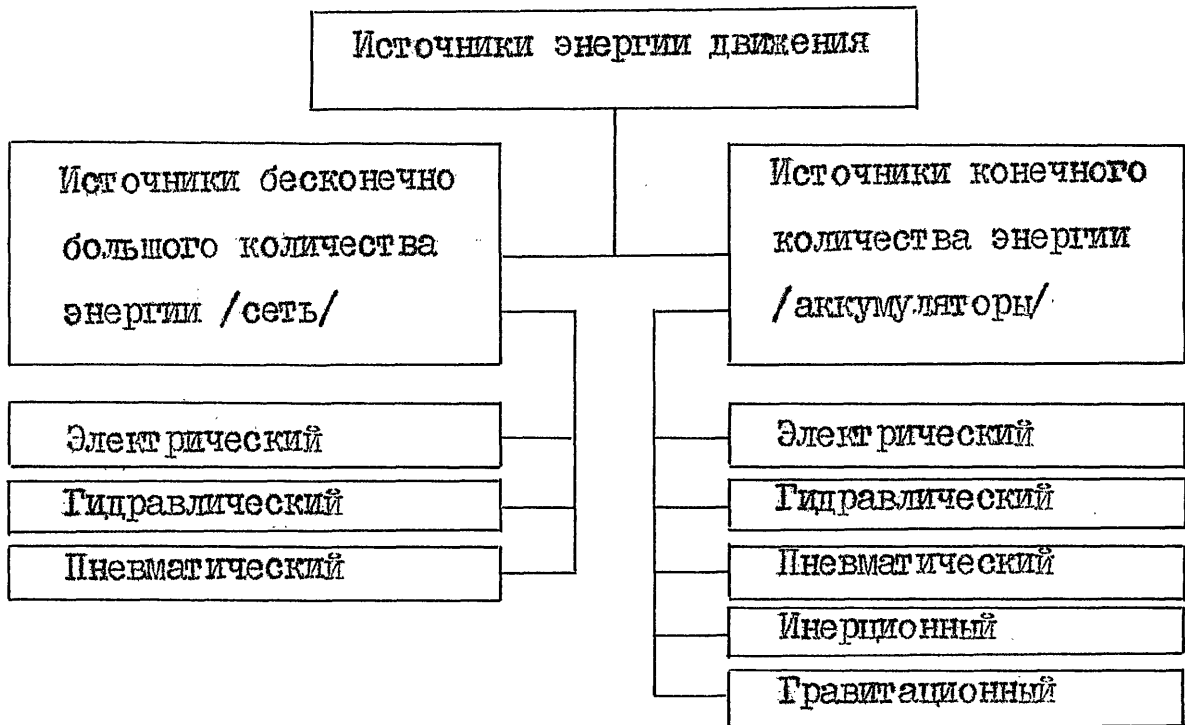


Рис.2.21. Классификация источников энергии движения.

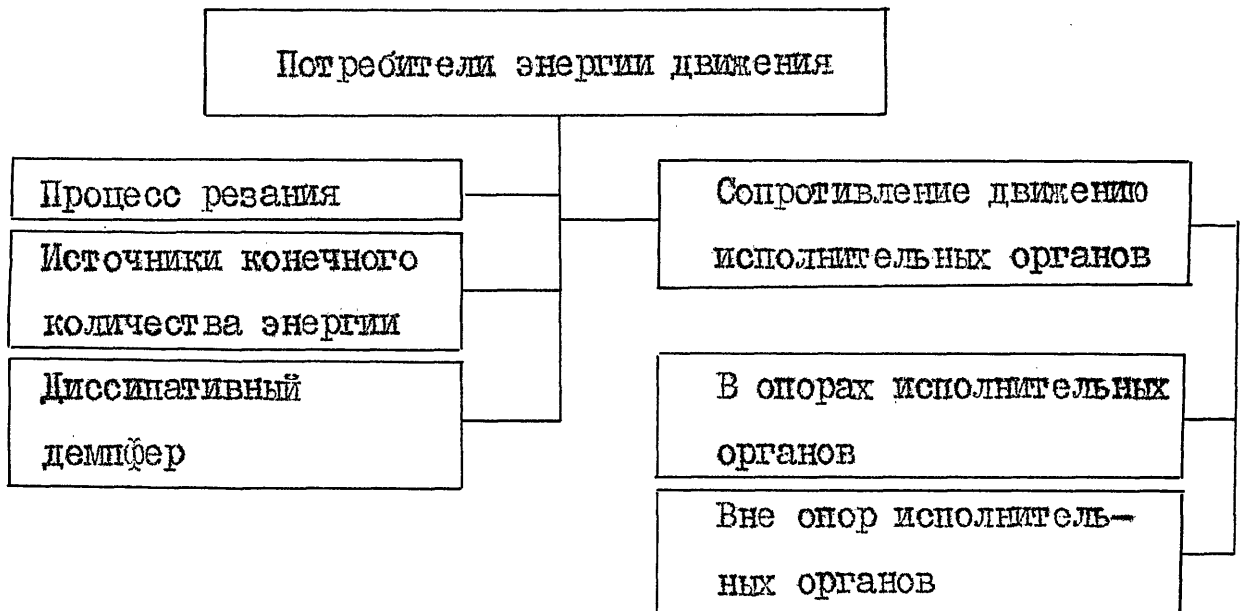


Рис.2.22. Классификация потребителей энергии движения.

струкции этого узла во многом зависит насколько велико будет возмущающее воздействие источника энергии движения на исполнительный орган. Некоторые виды соединительных элементов, имеющих характеристики, занимающие промежуточное значение между обычными соединительными элементами станков высокой точности и станков для точения ОГ поверхностей были исследованы в работе [28].

Привод шпиндельного узла.

Наиболее простым по исполнению источником энергии движения является инерционный источник, так как вращающийся шпиндель с зажимным приспособлением и обрабатываемой деталью имеет значительный запас кинетической энергии. Особенно эффективен этот источник для обработки торцовых ОГ поверхностей.

Действительно, кинетическая энергия вращающегося тела в форме сплошного диска определяется выражением [15]:

$$E_k = \frac{m \omega^2}{4} \cdot R^2, \quad / 2.3 /$$

где: m - масса тела,

ω - угловая частота вращения тела,

R - половина наружного диаметра тела,

а время, потребное на обработку торцовой поверхности этого диска определяется выражением:

$$t = \frac{R}{S}, \quad / 2.4 /$$

где: S — подача инструмента в единицу времени.

Таким образом, кинетическая энергия тела в форме сплошного диска пропорциональна квадрату радиуса этого диска, а время, потребное на обработку пропорционально первой степени этого радиуса. Следовательно, если, например, обеспечен запас кинетической энергии для обработки детали диаметром 100 мм, то в случае увеличения диаметра обрабатываемой детали запас кинетической энергии будет тем более достаточен при тех же условиях обработки /не смотря на то, что несколько возрастут аэродинамические потери из-за увеличения размеров детали/.

Если же энергии инерционного источника недостаточно, то для "подкрутки" шпинделя необходимо использовать маломощный двигатель. Например, маломощный электродвигатель или воздушную турбину [14], электродвигатель большой мощности, работающий в режиме маломощного /питание пониженным напряжением/. Причём ротор этого двигателя должен располагаться непосредственно на шпинделе, так как при этом значительно упрощается конструкция привода, а следовательно, уменьшаются затраты на его изготовление и наладку.

Как было показано выше, на резание /включая потери холостого хода/ необходимо незначительное количество энергии, а вот на разгон и торможение шпинделя затрачивается значительно большее количество энергии. Например, для разгона шпинделя с планшайбой станка мод. МКБ512 до частоты вращения 3000 об/мин за 3...4 сек с повторением цикла через 60 сек без нарушения работоспособности

двигателя и шпиндельного узла необходима мощность двигателя не менее 2,5 кВт. В то же время мощность, потребляемая на резание /включая потери холостого хода/ на этом же станке с глубиной резания 0,025 мм и подачей 0,01 мм/об составляет 50...100 Вт, что в 50...25 раз меньше мощности, требуемой на разгон /торможение/.

Отсюда можно сделать вывод, что привод шпинделя станка для точения ОТ поверхностей должен иметь два источника энергии движения:

1. Мощный источник - для разгона и торможения шпинделя, который отключается от шпинделя на время точения.
2. Маломощный источник - для обеспечения процесса точения.

Привод суппорта.

Использование бесконтактных опор в суппорте обеспечивает исключительно высокую точность траектории его движения и плавность этого движения. Однако в этих опорах практически отсутствует демпфирование колебаний в направлении движения суппорта. Поэтому, в опорно-приводном узле подачи станка для алмазного точения ОТ поверхностей необходим обязательный элемент - диссипативный демпфер. Этот демпфер служит для уменьшения амплитуды вынужденных колебаний, передаваемых от привода подачи и вынужденных колебаний, передаваемых от колебательной системы станины станка на виброизолирующих опорах.

Для осуществления простейших движений суппорта /прямолнейного и кругового/ может использоваться гравитационный источник энергии движения. Однако, он работоспо-

собен только при компоновках, специально созданных для этого привода и имеет ограниченные возможности в осуществлении реверсирования движения суппорта.

Наиболее эффективен пневмогидравлический привод подач, в котором сжатый воздух со стабилизированным давлением служит источником энергии движения, а жидкость, перекачиваемая из одной полости специального цилиндра в другую - диссипативным демпфером [25] , [26] .

Особое внимание в приводе подач станка для алмазного точения ОТ поверхностей следует обратить на расположение привода относительно направляющих суппорта, так как даже незначительное смещение точки приложения усилия приводного двигателя и диссипативного демпфера от средней точки между направляющими приводит к перекосам, которые создают дополнительную нагрузку на опоры суппорта и тем самым оказывают влияние на точность обработки /особенно при реверсировании движения суппорта/.

Как показал опыт, использование в приводе подач винтовых, ремённых, червячных и т.п. передач приводит к значительным колебаниям суппорта, которые проявляются на обработанной поверхности в виде волнистости с периодом равным циклической ошибке данной передачи /например, равным шагу винта/.

2.8.5. ЖЁСТКОСТЬ СИСТЕМЫ СПИД

По ГОСТ 18097-72 для токарных и токарно-винторезных станков нормальной точности регламентирована статическая жёсткость системы СПИД /проверка 3.1.а/ при наибольшем диаметре обрабатываемого изделия 100...500 мм в пределах: $1,75 \times 10^5 \dots 3,8 \times 10^5$ Н/м /1,75...3,8 кгс/ммкм /.

При алмазном точении ОГ поверхностей усилия резания, как правило, составляют 0,4...1,0 Н [29]. Задачимся допустимым смещением инструментального суппорта относительно шпинделя изделия 0,025 мм под действием силы 0,4...1,0 Н. При этом требуемая статическая жёсткость системы СПИД будет иметь значение: $1,6 \times 10^5 \dots 4 \times 10^5$ Н/м.

Таким образом, статическая жёсткость системы СПИД станка для алмазного точения ОГ поверхностей должна быть не меньше жёсткости системы СПИД станков нормальной точности.

Большое значение имеет динамическая жёсткость системы СПИД, так как она оказывает влияние на затраты, связанные в первую очередь с обеспечением условий обработки ОГ поверхности с заданной шероховатостью. Чем выше динамическая жёсткость системы СПИД, тем она менее чувствительна к внешним и внутренним источникам колебаний и, следовательно, при этом снижаются требования к изоляции от внешних источников колебаний и требования к точности балансировки вращающихся элементов станка.

2.8.6. ОСТАТОЧНАЯ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЬ ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

Амплитудное значение возмущающей силы, создаваемой остаточной неуравновешенностью определяется выражением [37]:

$$F_0 = 1,1 \cdot 10^{-2} D \cdot n^2, \quad / 2.5 /$$

где: F_0 - амплитудное значение возмущающей силы, Н;
 D - остаточная неуравновешенность, кгс·м;

$$D = m \cdot \varepsilon \quad / 2.6 /$$

m - масса вращающегося изделия, кг;
 ε - смещение центра масс, м;
 n - частота вращения изделия, об/мин.

С одной стороны допустимая остаточная неуравновешенность определяется допустимым амплитудным значением возмущающей силы $[F_0]$ и частотой вращения n :

$$D \leq 91,2 \frac{[F_0]}{n^2}, \quad / 2.7 /$$

а с другой стороны - допустимым смещением центра масс $[\varepsilon]$ и массой m :

$$D \leq m \cdot [\varepsilon]. \quad / 2.8 /$$

Возьмем значениями: $[F_0] = 0,2$ Н, $n = 2000$ об/мин,
тогда $D = 0,45 \times 10^{-5}$ кгс·м.

Теперь зададимся значениями: $m = 200$ кг, $[\varepsilon] = 0,025 \times 10^{-6}$ м, получим $D = 0,5 \times 10^{-5}$ кгс·м.

Проведённые расчёты показывают, что точность балансировки шпинделя с обрабатываемой деталью должна быть весьма высокой и поскольку допускаемое смещение центра масс значительно меньше одного микрометра в случае обработки деталей с относительно большим весом станок необходимо оснащать устройством для контроля остаточной неуравновешенности.

2.8.7. ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Для достижения требуемой точности обработки 0Γ поверхности необходимо с весьма высокой точностью располагать траектории движения исполнительных органов. Например, при алмазном точении плоской торцовой 0Γ поверхности диаметром 400 мм с заданной точностью формы 1,0 мкм отклонение взаимного расположения оси шпинделя и траектории движения поперечного суппорта от прямого угла должна быть менее одной угловой секунды.

Технологическое обеспечение столь высокой точности расположения траекторий движения вызывает большие трудности и при изготовлении и при эксплуатации станка. Поэтому в станках для алмазного точения 0Γ поверхностей необходимо предусматривать регулировку взаимного расположения траекторий движения исполнительных органов.

Большое влияние на взаимное расположение траекторий движения исполнительных органов оказывает правильная

компановка узлов станка. Если шпиндель станка с аэростатическими опорами расположен горизонтально, то вследствие относительно невысокой угловой жёсткости аэростатических опор при закреплении на шпинделе деталей разной массы происходит значительное угловое смещение оси шпинделя в пределах зазора в опорах /до 3...4 угловых секунд/.

В связи с этим, для обработки тяжёлых изделий ось шпинделя станка необходимо располагать вертикально, тогда независимо от массы установленной детали взаимное расположение траекторий движения шпинделя и суппорта будет оставаться неизменным.

2.9. ИЗОЛЯЦИЯ ОТ ИСТОЧНИКОВ КОЛЕБАНИЙ РАСПОЛОЖЕННЫХ ВНЕ СТАНКА

К источникам вынужденных относительных колебаний, расположенным вне станка относятся:

1. Системы, обеспечивающие работоспособность станка:

- электрооборудование,
- пневмооборудование,
- вакуумное оборудование /если зажим изделия вакуумный/.
- система удаления стружки,
- пульт управления,
- система стабилизации параметров воздушной среды помещения /температуры, влажности, пыльности/.

2. Оборудование, работающее в производственных помещениях, расположенных в непосредственной близости от помещения, где установлен станок.

3. Транспорт /автомобильный и железнодорожный/, проходящий по магистралям, расположенным поблизости от помещения, где установлен станок, землетрясения.

Как видно из вышеприведённого анализа, на шероховатость σ_f поверхности оказывают влияние колебания с частотой более 3 Гц. Поэтому изоляцию станка от источников вибрации, имеющих частоту возбуждающих колебаний более 3 Гц и расположенных вне станка, можно успешно осуществить при установке станка на пневматические виброизолирующие опоры /рис. 2.23/ разработанные ЭНИМСом, которые имеют собственную частоту колебаний 2...3 Гц.

Однако, низкая жёсткость пневматических виброизолирующих опор заставляет предъявлять повышенные требования к жёсткости станины станка, так как станина не должна быть чувствительной к колебаниям на пневмоопорах. То есть при перекачке на пневмоопорах не должно быть деформаций, приводящих к изменению относительного положения элементов станины, оказывающих влияние на параметры точности станка.

Большое значение имеет также правильная установка станины на пневматические виброизолирующие опоры. Во-первых, количество опорных точек должно быть не более трёх, так как это обеспечивает наиболее устойчивое положение станины. Введение дополнительной опоры /рис. 2.24/ приводит к созданию неустойчивой системы. Например, опоры 2 и 4 образуют ось вокруг которой происходит раскачка от опор 1 и 3. Во-вторых, очень важно правильно выбрать место расположения самих опор и их регуляторов.

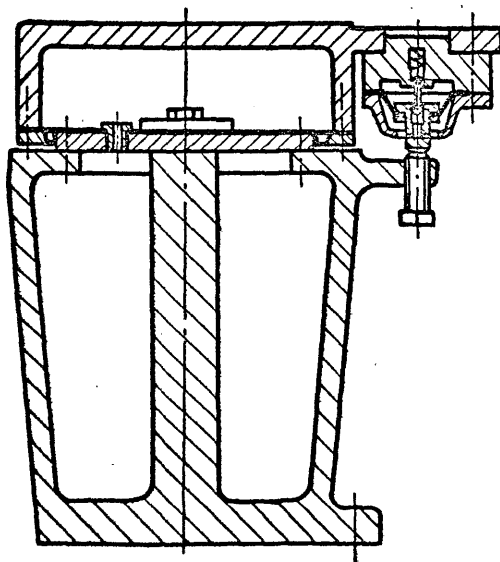


Рис.2.23. Пневматическая виброизолирующая опора.

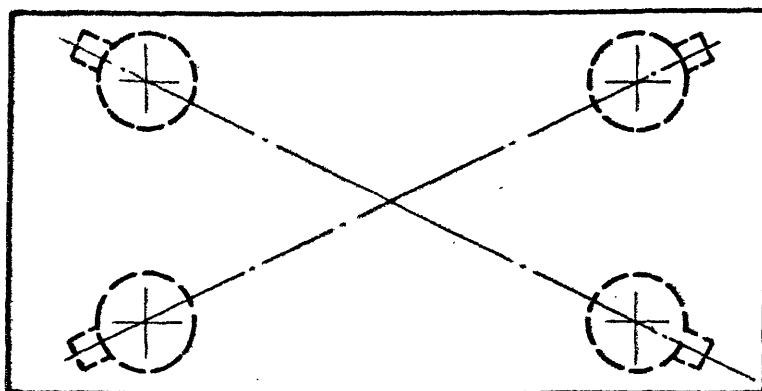


Рис.2.24. Стандартная схема установки на виброизолирующие опоры.

Критерием для правильной установки пневматических виброизолирующих опор является создание таких условий, чтобы в зоне резания /где расположены узлы, обеспечивающие формирование σ поверхности/ был возможно меньший уровень абсолютных колебаний станка как системы в целом.

Для этого пневматические виброизолирующие опоры необходимо расположить таким образом, чтобы зона резания оказалась в области близкой к точке пересечения медиан треугольника, образованного центрами виброизолирующих опор, а регуляторы этих опор были расположены вне этого треугольника на продолжении медиан /рис.2.25/.

Обычно резинOMETаллические виброизолирующие опоры рекомендуют устанавливать непосредственно под станину, что допустимо из-за небольших размеров /высота около 50 мм/ и относительно высокой жёсткости этих опор. Пневматические виброизолирующие опоры имеют большую высоту /200...300 мм/ и очень низкую жёсткость. Поэтому, в случае установки этих опор непосредственно под станину при приложении внешнего воздействия происходит раскачка станка с большой амплитудой /до нескольких миллиметров/.

Для уменьшения плеча колебаний, а значит и амплитуды абсолютных колебаний в зоне резания плоскость развѐма пневматических виброизолирующих опор необходимо располагать возможно ближе к плоскости, в которой происходит резание /рис.2.25/.

При использовании пневматических виброизолирующих опор необходимо обратить внимание на звуковую изоляцию помещения, в котором установлен станок, так как было

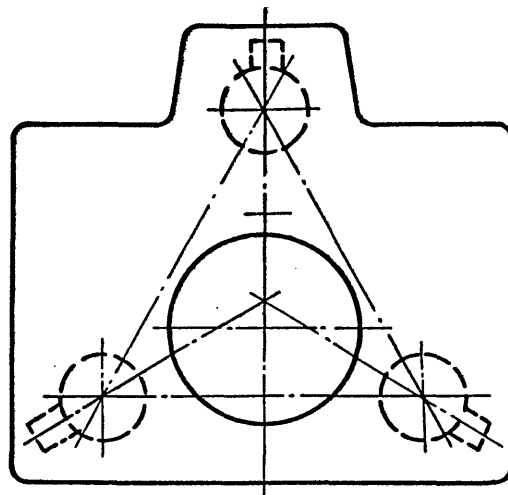
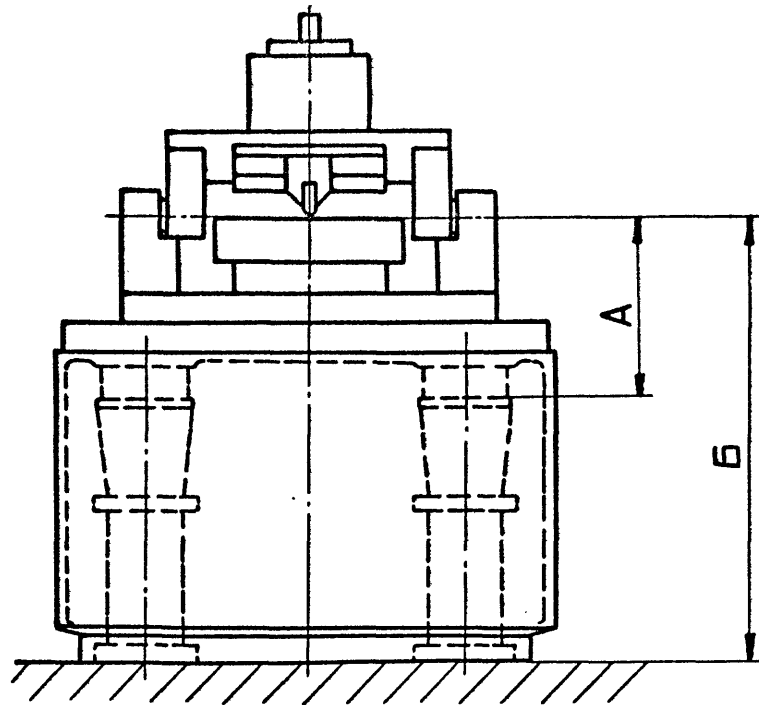


Рис.2.25. Рациональная схема установки станка на пневматические виброизолирующие опоры.

замечено, что при сильном кашле у оператора, стоящего около станка, на обрабатываемой поверхности образуются риски.

Соединение станка с системами, обеспечивающими его работоспособность, необходимо осуществлять только гибкими плангами и проводами.

Наиболее энергичные источники вибрации, обеспечивающие работоспособность станка /например, компрессоры, вакуумные насосы, устройства удаления стружки, кондиционеры и т.п./ необходимо располагать в отдельном помещении и оснащать активными виброизолирующими устройствами.

Недопустима работа вблизи помещения, где установлен станок, молотов, ножниц, прессов и т.п. оборудования, а также недопустимо расположение помещения вблизи автомобильных и железных дорог.

2.10. ТОЧЕНИЕ ТОРЦОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С МИНИМАЛЬНЫМ ЦЕНТРАЛЬНЫМ ДЕФЕКТОМ

Общезвестно, что при точении торцовой поверхности с приближением резца к оси вращения изделия скорость резания уменьшается /если частота вращения шпинделя постоянна/ и в пределе у оси стремится к нулю. Однако, если внимательно рассмотреть этот процесс, то можно заметить, что в зоне весьма близкой к оси вращения изделия процесс резания из точения /главное движение - вращение изделия/ постепенно переходит в строгание /главное движение - перемещение резца/. Таким образом, в зоне оси вращения изделия происходит строгание со скоростью резания равной

величине подачи резца и, следовательно, при определённых условиях, возможно точение торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом, соизмеримым с шероховатостью обработанной ОГ поверхности.

Для этого необходимо наклонить главную режущую кромку на угол λ таким образом, чтобы обеспечить благоприятные условия резания в центральной зоне.

Рассмотрим подробнее этот процесс. Обозначим /рис. 2.26/:

$V_{oi} = \pi \cdot D_i \cdot n$ — текущее значение составляющей скорости резания, определяемой вращением изделия, м/мин.

V_s — составляющая скорости резания, определяемая величиной подачи резца, м/мин.

V_p — результирующая скорость резания, м/мин.

D_i — текущее значение диаметра обработки, м.

n — частота вращения шпинделя, мин⁻¹.

Пусть $n = const$ и $V_s = const$, тогда

$$\bar{V}_p = \bar{V}_{oi} + \bar{V}_s, \quad / 2.9.1 /$$

а абсолютное значение результирующей скорости равно:

$$V_p = \sqrt{(\pi \cdot D_i \cdot n)^2 + V_s^2}. \quad / 2.10 /$$

Из выражения /2.10/ определим значение диаметра обработки D_s , начиная с которого при точении от периферии изделия к центру $V_s > V_{oi}$:

$$D_s = \frac{V_s}{\pi \cdot n}. \quad / 2.11 /$$

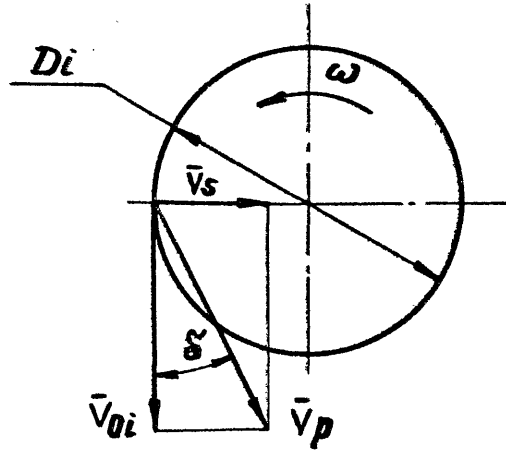


Рис.2.26. Схема скоростей резания.

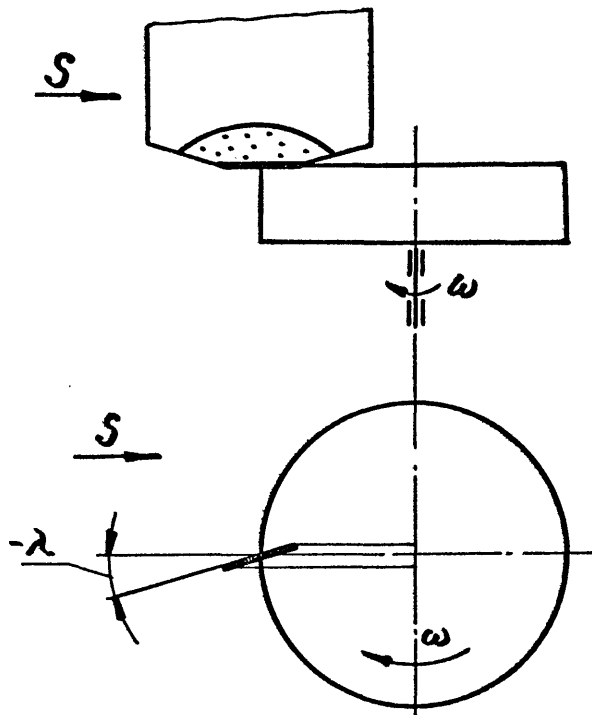


Рис.2.27. Схема установки режущей кромки резца.

Для реальных режимов обработки: $n = 500 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$,
 $V_s = 0,003 \dots 0,02 \text{ м/мин}$, а диаметр D_s равен $0,48 \dots$
 $12,7 \text{ мм}$.

Определим угол δ между вектором скорости резания, определяемой вращением изделия и вектором результирующей скорости резания:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{V_s}{V_{oi}} \quad / 2.12 /$$

Подставив значение V_{oi} и выражение D_s из /2.11/
получим:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{D_s}{D_i} \quad / 2.13 /$$

Анализ выражения /2.13/ показывает, что значительные изменения величины угла δ начинаются когда отношение $\frac{V_s}{V_{oi}} > 0,1$, то есть для реальных режимов обработки указанных выше при $D_i = 4,8 \dots 127 \text{ мм}$.

Таким образом, реально осуществимо точение торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом. Причём, практически до диаметра $4,8 \dots 127 \text{ мм}$ условия резания не изменяются.

Для экспериментальной проверки возможности точения торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом и уточнения условий обработки была проведена обработка образцов как при точении к центру, так и от центра изделия.

На стенде сферотокарного станка, созданного на базе

станка мод. МК6511 /рис.4.1/, были получены образцы, имеющие центральный дефект диаметром менее 40 мкм. Конфигурация и размер центрального дефекта определялись с помощью отсчётного микроскопа МИР-1М /увеличение от 19^{\times} до 33^{\times} , цена деления при длине тубуса 180 мм - 0,038 мм/. Уменьшить диаметр центрального дефекта на этом станке не удалось из-за отсутствия точной регулировки смещения α , а также точного и плавного отвода резца в центре изделия.

На станке мод. МК6513 /рис.5.1/ были предусмотрены необходимые регулировки и были проточены образцы, имеющие центральный дефект диаметром менее 1 мкм и высотой менее 0,15 мкм. Вид и размер центрального дефекта определялись с помощью микроинтерферометра МИИ-4 /увеличение 500^{\times} /.

При проведении этих экспериментов было определено, что для точения торцовой поверхности с минимальным центральным дефектом необходимо выполнить следующие условия /рис.2.27/:

1. Резец должен иметь зачистную грань /прямолинейную, радиусную и т.п./.
2. Угол наклона главной режущей кромки λ должен иметь отрицательное значение.
3. Проекция зачистной грани на плоскость, перпендикулярную траектории движения инструмента, должна пересекать ось вращения изделия.
4. Отвод резца /при точении к центру/ или врезание /при точении от центра/ должны осуществляться чрезвычайно плавно /по апериодическому закону/ с тем, чтобы резец не оставил на обработанной поверхности риски, вызванной

колебаниями при отводе или подводе резца.

5. Глубина резания должна быть минимальной — от нескольких микрометров до нескольких долей микрометра. Это необходимо для уменьшения усилий трения о заднюю поверхность резца, когда зачистная грань частично заходит за ось шпинделя изделия.

На станке мод. МК 6513 конструктивно надёжнее выполнен механизм плавного отвода резца, поэтому на нём выполнялось точение в направлении к оси шпинделя изделия.

На рис. 2.28 показаны характерные разновидности центральных дефектов, полученных при настройке на точение торцовой поверхности с минимальным центральным дефектом:

- а — ось шпинделя изделия расположена перед передней гранью резца,
- б — ось шпинделя расположена за задней гранью резца,
- в — отвод резца произошёл не доходя до оси шпинделя,
- г — произошёл "клевок" резца при отводе после прохода через ось шпинделя.

На основе опыта, полученного при экспериментальном точении торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом предлагается следующая методика настройки станка:

1. Резец устанавливается таким образом, чтобы ось шпинделя изделия была расположена перед передней гранью резца.
2. Производится пробная проточка.
3. С помощью микроскопа определяется вид и размер центрального дефекта.
4. Вносится коррекция по наиболее ярко выраженному пара-

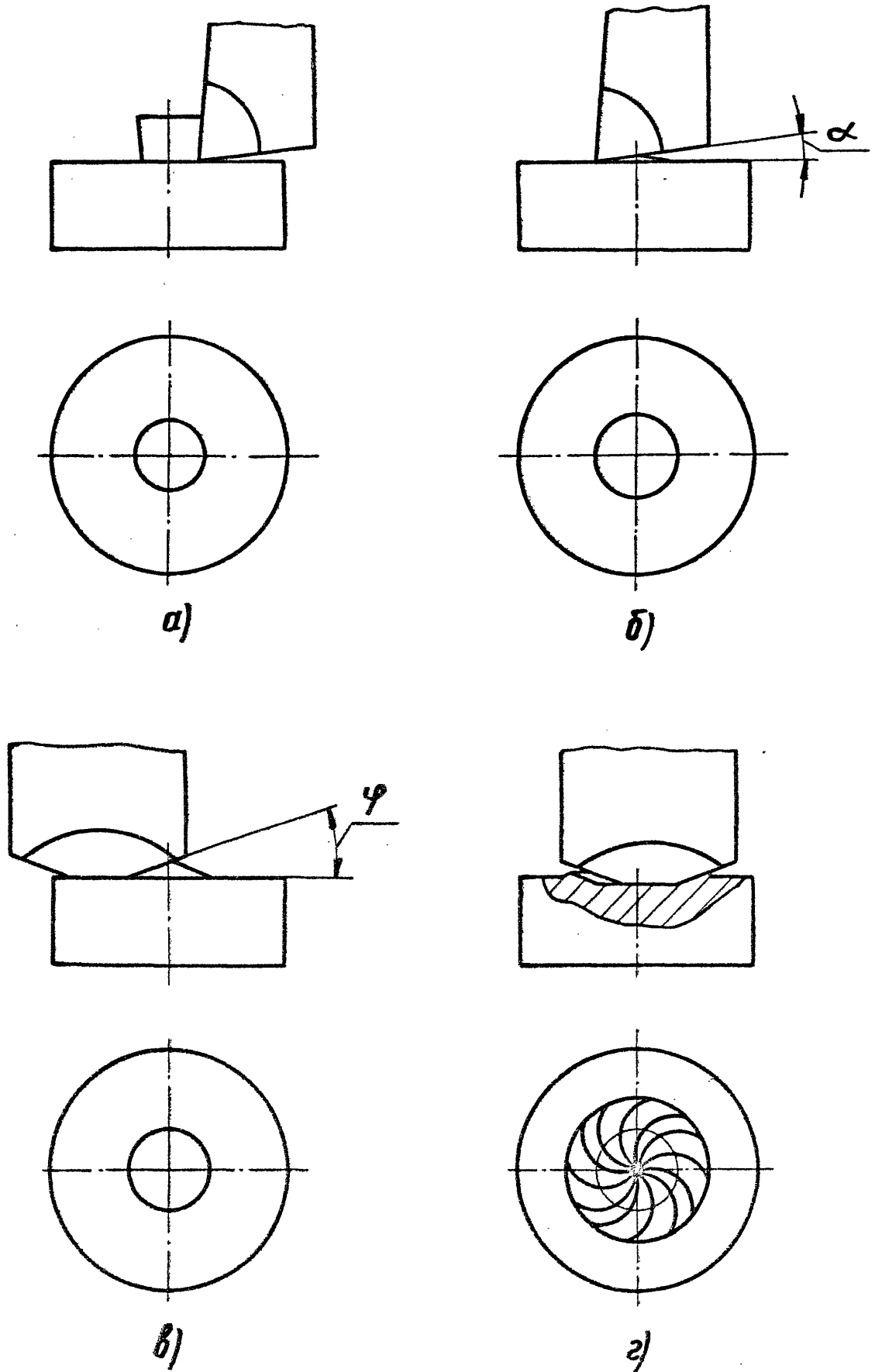


Рис. 2.23. Виды центральных дефектов.

метру настройки.

5. Производится новая пробная проточка.
6. Повторяются операции по пунктам 3, 4, 5 до тех пор, пока имеется возможность определить вид центрального дефекта и его размеры или до предела чувствительности регулировок.

2.11. ВЫВОДЫ

1. На основе опыта и исследований, проведённых при создании станков для алмазного точения 0Γ поверхностей выявлен комплекс факторов, оказывающих влияние на точность формы и размера обработанной поверхности.
2. В проведённых экспериментах износостойкость алмазного реза при точении цветных металлов составила 30 км, однако, физического предела износостойкости выявить не удалось. Практически износостойкость алмазного реза определяется вероятностью образования дефекта на режущей кромке из-за: неумелого обращения обслуживающего персонала с резцом, перерыва в подаче СОЖ в зону резания, наличия твёрдого включения в обрабатываемом материале и т.п.
3. Экспериментально показано, что при алмазном точении меди, алюминия, алюминиевых сплавов Д16МП, О1541 и т.п.:
 - возможна обработка с шероховатостью менее 0,01 мкм,
 - получение указанной шероховатости обработанной поверхности практически не зависит от изменения скорости резания в диапазоне 1730...0,005 м/мин.
4. Обоснована необходимость оснащения станков для алмазного точения 0Γ поверхностей механизмом врезания на глубину резания, обладающим разрешающей способностью 0,1 мкм.
5. Применительно к алмазному точению особо точных поверхностей выявлена взаимосвязь между параметрами вынужденных относительных колебаний и параметрами точности обработанной поверхности.

6. Произведён сопоставительный анализ известных опор исполнительных органов и обосновано использование аэро-статических опор для исполнительных органов в станках для алмазного точения σ поверхностей.
7. На основе анализа вариантов приводов шпинделя изделия и условий их работы сделан вывод, что привод шпинделя станка для алмазного точения σ поверхностей должен иметь два источника энергии движения:
 - мощный источник - для разгона и торможения, который отключается на время точения,
 - маломощный источник /лучше аккумулятор/ - для обеспечения процесса точения.
8. На основе анализа вариантов привода суппорта и условий его работы сделан вывод, что в опорно-приводном узле подачи необходим обязательный элемент - диссипативный демпфер и, что для осуществления простейших движений /прямолинейного и кругового/ наиболее эффективен пневмогидравлический привод подачи.
9. Жёсткость системы СШД станка для алмазного точения σ поверхностей должна быть не меньше жёсткости системы СШД станков нормальной точности.
10. Для алмазного точения σ поверхностей точность балансировки шпинделя с обрабатываемой деталью должна быть весьма высокой - для детали массой 200 кг при частоте вращения шпинделя 2000 мин^{-1} остаточная неуравновешенность не должна превышать значения $0,5 \times 10^{-5} \text{ кгс} \cdot \text{м}$.
- II. Для обеспечения требуемой точности взаимного расположения траекторий движения исполнительных органов в

конструкции станка необходимо предусматривать возможность регулировки взаимного расположения этих траекторий, а для обработки тяжёлых деталей ось шпинделя необходимо располагать вертикально, чтобы избежать угловых смещений шпинделя при установке деталей разной массы.

12. Выявлены источники колебаний, расположенные вне станка и разработаны правила рациональной установки станка на пневматические виброизолирующие опоры.
13. Разработан и реализован способ точения торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом. Показана возможность точения торцовых поверхностей с центральным дефектом диаметром менее 1 мкм и высотой менее 0,15 мкм. Разработана методика настройки станка.

ГЛАВА 3. ТОЧНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ СТАНКА И ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Проведённые выше исследования явились предпосылкой для создания способа [41] и станка, предназначенных для алмазного точения плоских, сферических и несферических [39] поверхностей. Сущность способа состоит в следующем: ось поворотного суппорта устанавливается под углом α к оси шпинделя обрабатываемого изделия, который задают в пределах $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, режущая кромка инструмента располагается на расстоянии R_u от оси поворотного суппорта, а радиус кривизны R_k обрабатываемой поверхности определяется по формуле:

$$R_k = \frac{R_u}{\sin \alpha}$$

Для обработки несферических поверхностей обрабатываемому изделию или режущему инструменту можно дополнительно: сообщать поступательное перемещение вдоль оси шпинделя изделия; сообщать угловое перемещение оси поворотного суппорта в плоскости, образованной осями шпинделя изделия и поворотного суппорта, вокруг оси, перпендикулярной к этой плоскости и лежащей в плоскости, касательной к обрабатываемой поверхности и перпендикулярной к оси шпинделя изделия; а также в соответствии с [47] сообщать поступательное перемещение вдоль оси поворотного суппорта, причём скорость поступательного перемещения является функцией круговой подачи поворотного суппорта.

На рис.3.1. изображены схемы обработки выпуклых /а/, вогнутых /б/ и плоских /в/ торцовых поверхностей.

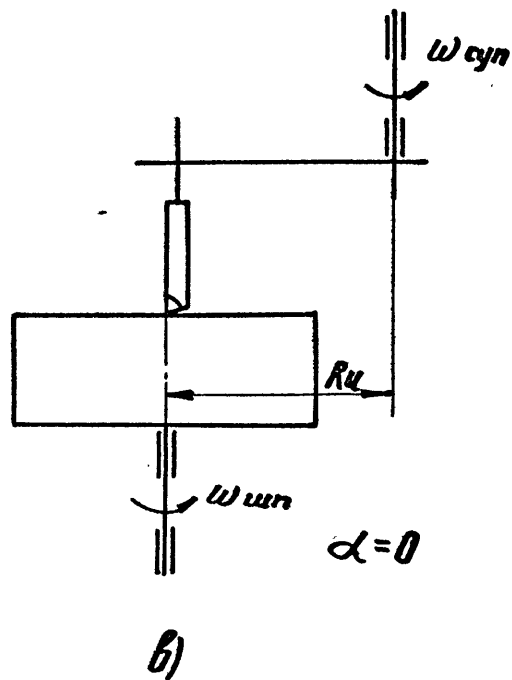
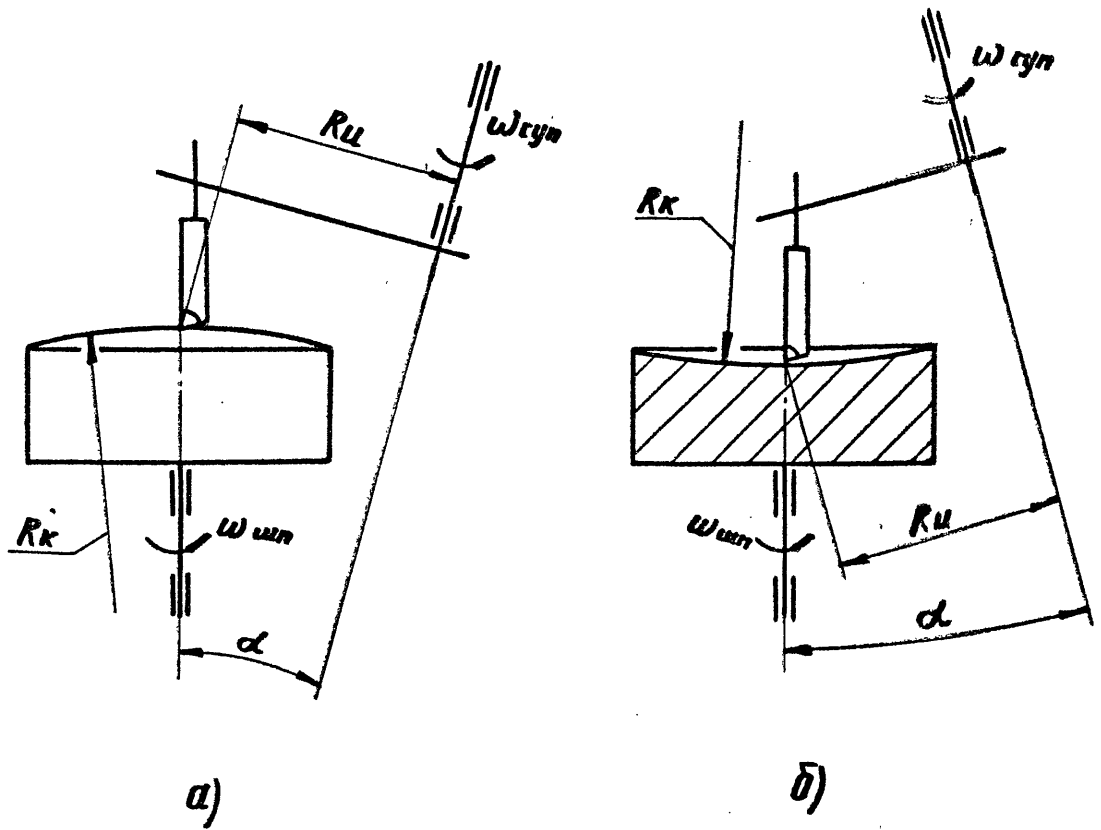


Рис.3.1. Схемы обработки сферических и плоских торцовых поверхностей поворотным суппортом.

На рис.3.2. изображены схемы обработки несферических торцовых поверхностей с использованием дополнительных перемещений: вдоль оси шпинделя /а/, вокруг полюса обрабатываемой поверхности /б/, вдоль оси поворотного суппорта /в/.

В работе [19] рассмотрено влияние некоторых параметров настройки станка на размерные параметры поверхности, обработанной этим способом. Вопросы же достижения требуемой точности формы и размера не исследованы. Экспериментальное определение этих зависимостей оказалось бы слишком длительным и трудоёмким, поэтому был проведён теоретический анализ, изложенный в настоящей главе.

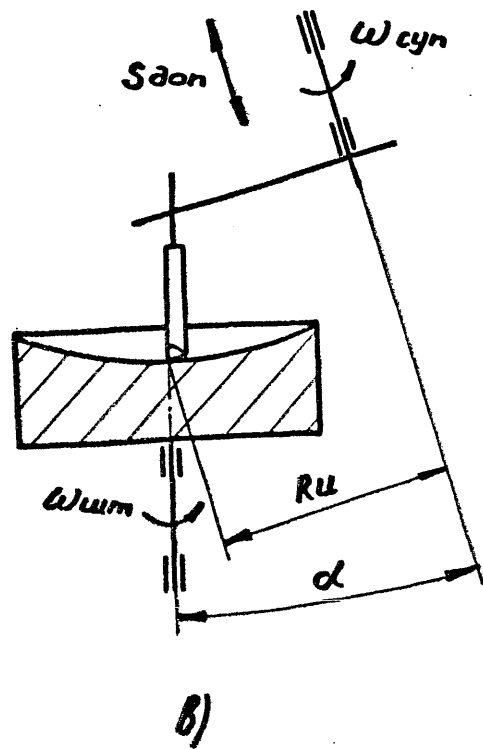
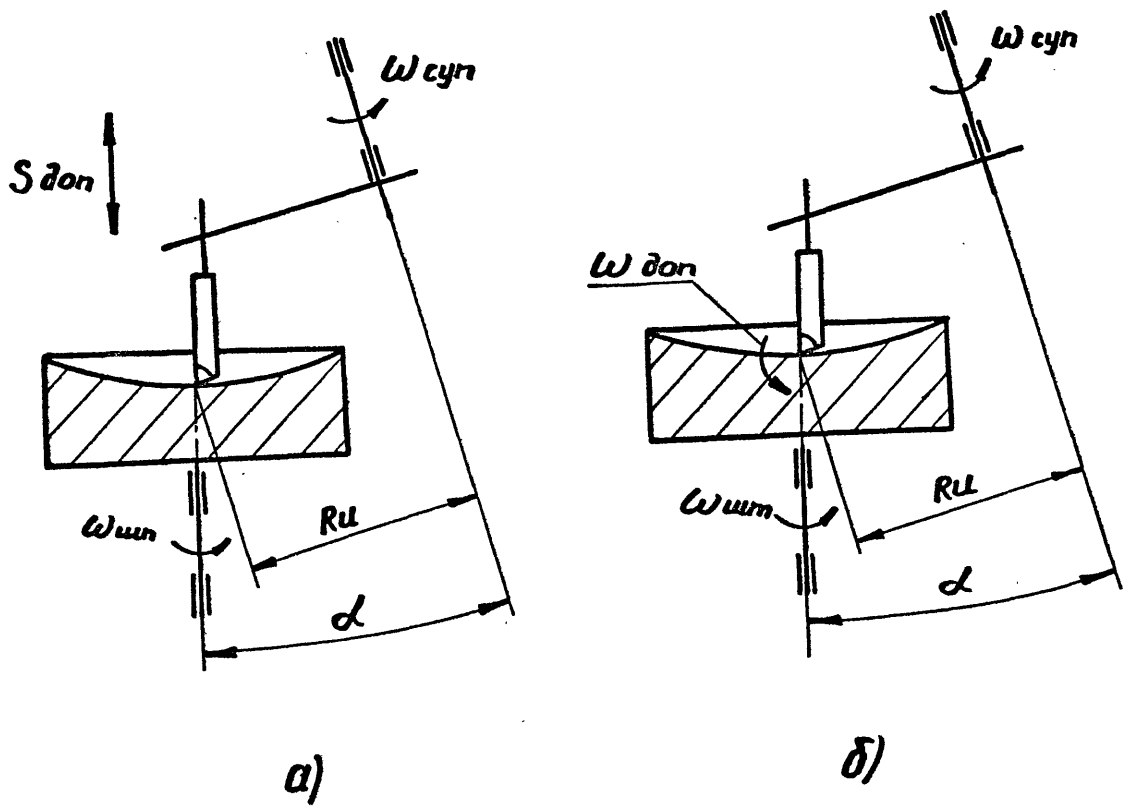


Рис.3.2. Схемы обработки несферических торцовых поверхностей поворотным суппортом.

3.1. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ

Допустим, что режущая кромка инструмента имеет точечный контакт с обрабатываемой поверхностью и рассмотрим траекторию движения этой точки контакта как образующую обработанной поверхности.

В этом случае поверхность, обработанная поворотным суппортом описывается следующей системой уравнений [21]
/рис.3.3/:

$$\begin{cases} x = (\cos \alpha) \cdot \bar{x} - (\sin \alpha \cdot \sin \beta) \cdot \bar{y} + x_0 \\ y = (\cos \beta) \cdot \bar{y} + y_0 \\ z = (\sin \alpha) \cdot \bar{x} + (\cos \alpha \cdot \sin \beta) \cdot \bar{y} \end{cases} \quad / 3.1. /$$

где: \bar{x}, \bar{y} - текущие координаты траектории формообразующей точки режущей кромки инструмента в системе координат $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ инструмента /система координат поворотного суппорта/, которые связаны зависимостью:

$$(R_v - \bar{x})^2 + \bar{y}^2 = R_v^2 \quad / 3.2 /$$

R_v - радиус траектории движения формообразующей точки режущей кромки инструмента,

x, y, z - текущие координаты точки P контакта режущей кромки инструмента с поверхностью изделия в системе координат $OXYZ$ изделия /система координат шпинделя изделия/, которые связаны зависимостью:

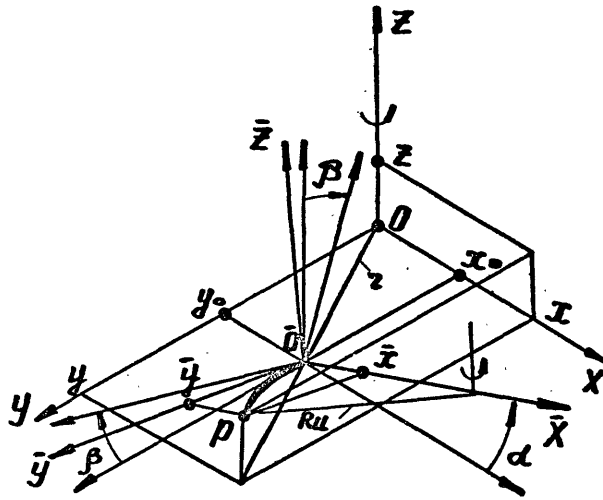


Рис.3.3. Схема обработки торцовых поверхностей поворотным суппортом с учётом параметров настройки.

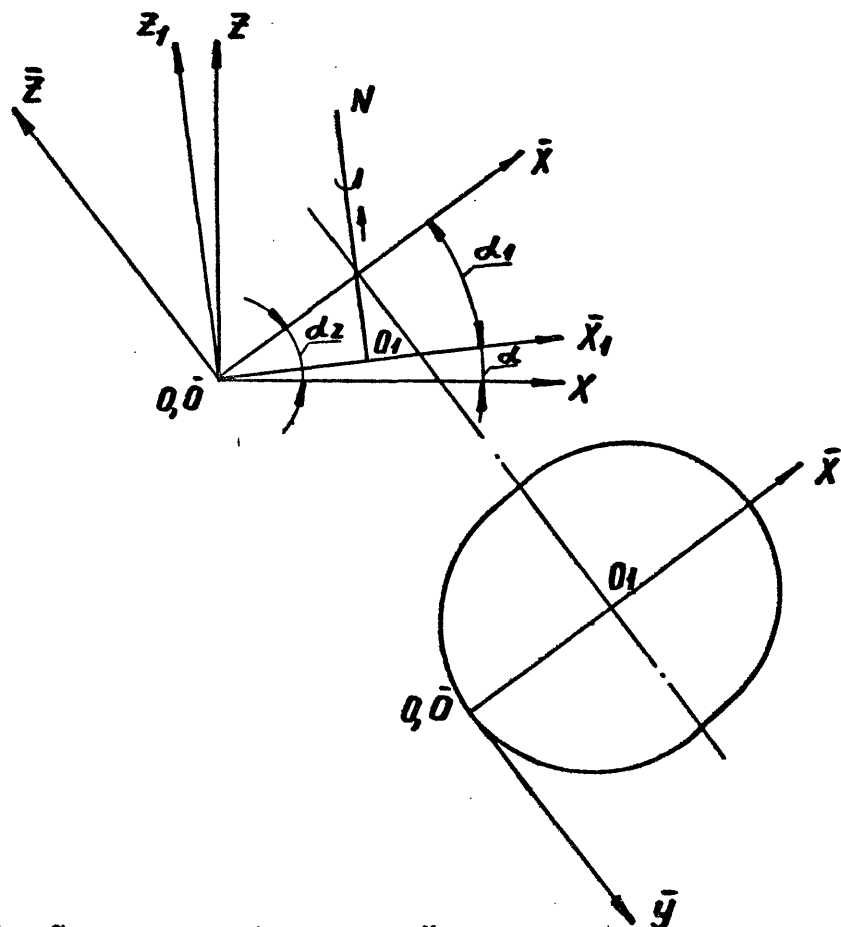


Рис.3.4. Схема обработки несферических поверхностей /осевое движение суппорта/.

$$x^2 + y^2 = z^2$$

/ 3.3 /

- z - расстояние от оси вращения инструмента до точки P .
- x_0 - смещение начала координат \bar{O} вдоль оси Ox ; назовём это смещение - параметр настройки по центральному выступу.
- y_0 - смещение начала координат \bar{O} вдоль оси Oy ; назовём это смещение - линейный параметр торообразности.
- z_0 - смещение начала координат \bar{O} вдоль оси Oz ; назовём это смещение - параметр глубины резания /технологический параметр/; принимаем $z_0 = 0$, так как это смещение определяет лишь глубину резания и в настоящем анализе не учитывается.
- α - угол наклона оси поворотного суппорта к оси вращения изделия в плоскости xOz ; назовём этот угол - параметр, определяющий радиус сферы.
- β - угол поворота системы $\bar{O}\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ относительно системы $Oxyz$ вокруг оси Ox ; назовём этот угол - угловой параметр торообразности.
- γ - угол поворота системы $\bar{O}\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ вокруг оси Oz ; назовём этот угол - параметр скорости резания /для обработки точением/ и - параметр подачи /для обработки фрезерованием/ - технологический параметр; Принимаем $\gamma = 0$, так как формирование поверхности осуществляется вращением вокруг оси Oz .
- θ - угол поворота радиус-вектора R_v в системе координат

нат $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$, назовём этот угол - параметр подачи /для обработки точением/ и - параметр скорости резания /для обработки фрезерованием/ - технологический параметр.

Заметим, что параметры z_0 , γ и θ являются технологическими параметрами, определяющими режимы обработки. Влияние этих параметров на точность формы и размера обработанной поверхности отдельный вопрос, который рассматривался во второй главе и в настоящем анализе не рассматривается.

Теперь допустим, что траектория движения формообразующей точки режущей кромки инструмента в системе $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ /рис.3.3/ имеет форму эллипса, полученного сложением двух движений: поворота вокруг оси O_1N /рис.3.4/ и смещением вдоль этой оси.

В этом случае поверхность, обработанная поворотным суппортом описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x = (\cos \alpha_2) \cdot \bar{x} - (\sin \alpha_2 \cdot \sin \beta) \cdot \bar{y} + x_0 \\ y = (\cos \beta) \cdot \bar{y} + y_0 \\ z = (\sin \alpha_2) \cdot \bar{x} + (\cos \alpha_2 \cdot \sin \beta) \cdot \bar{y}, \end{cases} \quad / 3.4 /$$

где: \bar{x}, \bar{y} - текущие координаты точки P в системе координат $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$, которые связаны зависимостью:

$$\frac{\left(\frac{Ru}{\cos \alpha_1} - \bar{x} \right)^2}{\left(\frac{Ru}{\cos \alpha_1} \right)^2} + \frac{\bar{y}^2}{R_u^2} = 1; \quad / 3.5 /$$

$\alpha_2 = \alpha + \alpha_1$ - угол между осью $\bar{O}\bar{X}$ и осью Ox ; назовём - параметр, определяющий знак поверхности /выпуклость или вогнутость/.

α_1 - угол между осью $\bar{O}\bar{X}_1$ и осью Ox ; назовём - параметр, определяющий параметр параболоида.

3.2. АНАЛИЗ ОБЩЕГО УРАВНЕНИЯ

Из системы /3.4/ и соотношений /3.3/, /3.5/ видно, что параметрами настройки на точность формы и размера обработанной поверхности являются параметры: R_u , α , α_1 , x_0 , y_0 , β . Кроме этого очевидно, что от значений углов α и α_1 зависит вид обработанной поверхности.

Поэтому рассмотрим условия образования каждого вида поверхностей при следующих значениях параметров настройки:

$$\begin{aligned} R_u &= R_{uT}; & x_0 &= 0; \\ \alpha &= \alpha_T; & y_0 &= 0; \\ \alpha_1 &= \alpha_{1T}; & \beta &= 0; \end{aligned}$$

где: R_{uT} , α_T , α_{1T} - теоретическое значение параметров R_u , α , α_1 .

В этом случае система /3.4/ преобразуется к виду:

$$\begin{cases} x = (\cos \alpha_2) \cdot \bar{x} \\ y = \bar{y} \\ z = (\sin \alpha_2) \cdot \bar{x} \end{cases} \quad / 3.6 /$$

После подстановок из выражений /3.3/, /3.5/ и преобразований система /3.6/ сводится к следующему уравнению:

$$x^2 + y^2 - \frac{\cos^2(\alpha + \alpha_1) - \cos^2 \alpha_1}{\sin^2(\alpha + \alpha_1)} \cdot z^2 - 2Ru \frac{\cos \alpha_1}{\sin(\alpha + \alpha_1)} \cdot z = 0. \quad / 3.7 /$$

Исследуем уравнение /3.7/.

1. Пусть $\alpha = 0$; $\alpha_1 = 0$, тогда $\alpha_2 = 0$ и уравнение /3.7/ после преобразований примет вид:

$$z = 0. \quad / 3.8 /$$

Уравнение /3.8/ есть уравнение плоскости.

2. Пусть $\alpha \neq 0$; $\alpha_1 = 0$, тогда $\alpha_2 = \alpha$ и уравнение /3.7/ после преобразований примет вид:

$$x^2 + y^2 + \left(z - \frac{Ru}{\sin \alpha} \right)^2 = \left(\frac{Ru}{\sin \alpha} \right)^2. \quad / 3.9 /$$

Уравнение /3.9/ есть уравнение сферы с радиусом:

$$R_{сф} = \frac{Ru}{\sin \alpha}, \quad / 3.10 /$$

смещённой вдоль оси OZ на величину $\frac{Ru}{\sin \alpha}$ в положительном направлении. Причём, если $\alpha_2 = \alpha > 0$, то сфера вогнутая, а если $\alpha_2 = \alpha < 0$, то - выпуклая.

3. Пусть $\alpha = 0$; $\alpha_1 \neq 0$, тогда $\alpha_2 = \alpha_1$ и уравнение /3.7/ после преобразований примет вид:

$$x^2 + y^2 = 2 \frac{Ru}{\operatorname{tg} \alpha_1} \cdot z. \quad / 3.11 /$$

Уравнение /3.11/ есть уравнение параболоида вращения с фокальным параметром:

$$p = \frac{Ru}{\operatorname{tg} \alpha_1} \quad / 3.12 /$$

Причём, если $\alpha_2 = \alpha_1 > 0$, то параболоид вогнутый, а если $\alpha_2 = \alpha_1 < 0$, то - выпуклый.

4. Пусть $\alpha \neq 0$; $\alpha_1 \neq 0$, тогда $\alpha_2 = \alpha + \alpha_1$ и уравнение /3.7/ после преобразований примет вид:

$$\frac{\left(z + Ru \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{\sin \alpha_2}{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1} \right)^2}{\left(Ru \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{\sin \alpha_2}{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1} \right)^2} - \frac{1}{Ru^2} \left(\frac{\cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \alpha_1} - 1 \right) (x^2 + y^2) = 1; \quad / 3.13 /$$

Обозначим:

$$Ru \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{\sin \alpha_2}{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1} = A, \quad / 3.14 /$$

$$\frac{1}{\frac{1}{Ru^2} \left(\frac{\cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \alpha_1} - 1 \right)} = B^2. \quad / 3.15 /$$

Теперь, если $B^2 > 0$, то после подстановок из выражений /3.14/ и /3.15/ уравнение /3.13/ примет вид:

$$\frac{(z + A)^2}{A^2} - \frac{x^2}{B^2} - \frac{y^2}{B^2} = 1. \quad / 3.16 /$$

Уравнение /3.16/ есть уравнение гиперболоида вращения с фокальным параметром:

$$p = R_u \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_2}, \quad / 3.17 /$$

смещённого вдоль оси OZ на величину A в отрицательном направлении. Причём, если $\alpha_2 = (\alpha + \alpha_1) > 0$, то гиперболоид вогнутый, а если $\alpha_2 = (\alpha + \alpha_1) < 0$, то - выпуклый.

Если величина $B^2 < 0$, то после подстановок из выражений /3.14/ и /3.15/ уравнение /3.13/ примет вид:

$$\frac{(z + A)^2}{A^2} + \frac{x^2}{B^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1. \quad / 3.18 /$$

Уравнение /3.18/ есть уравнение эллипсоида вращения с фокальным параметром, определяемым выражением /3.17/, смещённого вдоль оси OZ на величину A в положительном направлении. Причём, если $\alpha_2 = (\alpha + \alpha_1) > 0$, то эллипсоид вогнутый, а если $\alpha_2 = (\alpha + \alpha_1) < 0$, то - выпуклый.

Эксцентриситет всех полученных поверхностей определяется выражением:

$$e = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}. \quad / 3.19 /$$

Условия обработки поворотным суппортом всех указанных поверхностей сведены в таблицу 3.1.

Таким образом, поворотным суппортом можно обработать: плоскость, выпуклые и вогнутые - сферу, параболоид, гиперболоид и эллипсоид.

3.3. ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим влияние каждого параметра настройки и группы параметров настройки на точность обработанной поверхности.

Из уравнений /3.9/, /3.11/, /3.16/, /3.18/ видно, что параметры R_u , α , α_1 не оказывают влияние на точность формы обработанной поверхности, а от их значений зависит только точность размера обработанной поверхности.

3.3.1. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА R_u

Положим, что

$$R_{ug} = R_{ut} + \Delta R_u, \quad / 3.20 /$$

где: R_{ug} — действительное значение величины R_u ,
 ΔR_u — абсолютная погрешность параметра R_u .

Положим также, что

$$p_g = p_T + \Delta p(R_u), \quad / 3.21 /$$

где: p_g — действительное значение величины p .
 $\Delta p(R_u)$ — абсолютная погрешность фокального параметра обработанной поверхности, вызванная неточностью параметра R_u .

Условимся относительную погрешность фокального параметра обработанной поверхности определять выражением:

Таблица 3.1.

Параметры настройки для получения поверхностей второго порядка

| Обрабатываемая поверхность | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---|---|---|---|-------|
| Плоскость | Сфера | | Параболоид | | Гиперболоид | | Эллипсоид | | Схема |
| | Сферическая | Выпуклая | Выпуклый | Выпуклый | Выпуклый | Выпуклый | Выпуклый | Выпуклый | |
| R | ∞ | $\frac{R_1}{\sin \alpha}$ | $R_1 \cdot \cos \alpha_1$ | $R_1 \cdot \cos \alpha_1$ | $R_1 \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin(\alpha + \alpha_1)}$ | $R_1 \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin(\alpha + \alpha_1)}$ | $R_1 \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin(\alpha + \alpha_1)}$ | $R_1 \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin(\alpha + \alpha_1)}$ | |
| e | ∞ | 0 | 1 | 1 | > 1 | > 1 | < 1 | < 1 | |
| α | 0 | $+\alpha$ | $-\alpha$ | 0 | $+\alpha$ | $-\alpha$ | $+\alpha$ | $-\alpha$ | |
| α_1 | 0 | 0 | $+\alpha_1$ | $-\alpha_1$ | -10° | $+10^\circ$ | -10° | $+10^\circ$ | |
| α_2 | 0 | $+\alpha$ | $-\alpha$ | $+\alpha_1$ | > 0 | < 0 | > 0 | < 0 | |
| | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta p}{p_T} \quad / 3.22 /$$

В выражения /3.10/, /3.12/, /3.17/ подставим значения R_{ug} из /3.20/, а значения p_g из /3.21/ и после преобразования соответственно получим:

- для сферы:

$$\Delta p(R_u) = \frac{\Delta R_u}{\sin \alpha} ; \quad / 3.23 /$$

- для параболоида:

$$\Delta p(R_u) = \frac{\Delta R_u}{\operatorname{tg} \alpha_1} ; \quad / 3.24 /$$

- для гиперболоида и эллипсоида:

$$\Delta p(R_u) = \Delta R_u \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_2} . \quad / 3.25 /$$

После подстановки значений Δp из /3.23/, /3.24/, /3.25/ и значений p из /3.10/, /3.12/, /3.17/ в выражение /3.22/ и преобразований для всех рассмотренных поверхностей получим:

$$\varepsilon_p(R_u) = \frac{\Delta R_u}{R_{uT}} , \quad / 3.26 /$$

где: $\varepsilon_p(R_u)$ - относительная погрешность фокального параметра, определяемая погрешностью параметра R_u .

Обозначим:

$$\frac{\Delta R_u}{R_{uT}} = \varepsilon_{R_u},$$

где: ε_{R_u} - относительная погрешность параметра R_u .

3.3.2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА α

Положим, что

$$\alpha_g = \alpha_T + \Delta\alpha, \quad / 3.27 /$$

тогда после подстановки значений α_g из /3.27/ и β_g из /3.21/ в выражения /3.10/, /3.17/ и после преобразований соответственно получим:

- для сферы:

$$\Delta\beta(\alpha) = R_u \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha_T + \Delta\alpha)} - \frac{1}{\sin\alpha_T} \right]; \quad / 3.28 /$$

- для гиперboloида и эллипсоида:

$$\Delta\beta(\alpha) = R_u \cdot \cos\alpha_1 \cdot \left\{ \frac{1}{\sin[(\alpha_T + \alpha_1) + \Delta\alpha]} - \frac{1}{\sin(\alpha_T + \alpha_1)} \right\}. \quad / 3.29 /$$

После подстановки значений $\Delta\beta$ из /3.28/, /3.29/ и значений β из /3.10/, /3.17/ в выражение /3.22/ и преобразований соответственно получим:

- для сферы:

$$\varepsilon_{\beta}(\alpha) = \frac{\sin\alpha_T}{\sin[\alpha_T \cdot (1 + \varepsilon\alpha)]} - 1, \quad / 3.30 /$$

где: $\varepsilon_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_T}$ - относительная погрешность параметра α .

- для гиперболоида и эллипсоида:

$$\varepsilon_p(\alpha) = \frac{\sin(\alpha_T + \alpha_1)}{\sin[\alpha_T \cdot (1 + \varepsilon_\alpha) + \alpha_1]} - 1. \quad / 3.31 /$$

3.3.3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА α_1

Положим, что

$$\alpha_{1g} = \alpha_{1T} + \Delta\alpha_1, \quad / 3.32 /$$

тогда после подстановки значения α_{1g} из /3.32/ и значения β_g из /3.21/ в выражения /3.12/, /3.17/ и после преобразований соответственно получим:

- для параболоида:

$$\Delta p(\alpha_1) = R_u \cdot \left[\frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)} - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha_{1T}} \right]; \quad / 3.33 /$$

- для гиперболоида и эллипсоида:

$$\Delta p(\alpha_1) = R_u \cdot \left\{ \frac{\cos(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)}{\sin[\alpha + (\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)]} - \frac{\cos\alpha_{1T}}{\sin(\alpha + \alpha_{1T})} \right\}. \quad / 3.34 /$$

После подстановки значений $\Delta p(\alpha_1)$ из /3.33/, /3.34/ и значений p из /3.12/, /3.17/ в выражение /3.22/ и преобразований соответственно получим:

- для параболоида:

$$\varepsilon_p(\alpha_1) = \frac{\operatorname{tg}\alpha_{1T}}{\operatorname{tg}[\alpha_{1T} \cdot (1 + \varepsilon_\alpha)]} - 1, \quad / 3.35 /$$

где: $\varepsilon_{\alpha_1} = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_{1T}}$ - относительная погрешность параметра α_1 ,
 - для гиперболоида и эллипсоида:

$$\varepsilon_p(\alpha_1) = \frac{\cos[\alpha_{1T} \cdot (1 + \varepsilon_{\alpha_1})]}{\sin[\alpha + \alpha_{1T} \cdot (1 + \varepsilon_{\alpha_1})]} \cdot \frac{\sin(\alpha + \alpha_{1T})}{\cos \alpha_{1T}} - 1. \quad / 3.36 /$$

3.3.4. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ α И α_1

Подставим значения α_g из /3.27/, α_{1g} из /3.32/ и β_g из /3.21/ в выражение /3.17/ и после преобразований для гиперболоида и эллипсоида получим:

$$\Delta p(\alpha, \alpha_1) = R_u \cdot \left\{ \frac{\cos(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)}{\sin[(\alpha_T + \Delta\alpha) + (\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)]} - \frac{\cos \alpha_{1T}}{\sin(\alpha_T + \alpha_{1T})} \right\}. \quad / 3.37 /$$

После подстановки значения $\Delta p(\alpha, \alpha_1)$ из /3.37/ и значения β из /3.17/ в выражение /3.22/ и преобразований для гиперболоида и эллипсоида получим:

$$\varepsilon_p(\alpha, \alpha_1) = \frac{\cos[\alpha_{1T} \cdot (1 + \varepsilon_{\alpha_1})]}{\sin[\alpha_T \cdot (1 + \varepsilon_{\alpha}) + \alpha_{1T} \cdot (1 + \varepsilon_{\alpha_1})]} \cdot \frac{\sin(\alpha_T + \alpha_{1T})}{\cos \alpha_{1T}} - 1. \quad / 3.38 /$$

3.3.5. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ

$$R_u, \alpha, \alpha_1$$

Подставим значения R_{ug} из /3.20/, α_g из /3.27/, α_{1g} из /3.32/, β_g из /3.21/ в выражения /3.10/, /3.12/, /3.17/ и после преобразований соответственно получим:

- для сферы:

$$\Delta p(R_u, \alpha, \alpha_1) = R_{uT} \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha_T + \Delta\alpha)} - \frac{1}{\sin \alpha_T} \right] + \frac{\Delta R_u}{\sin(\alpha_T + \Delta\alpha)}; \quad / 3.39 /$$

- для параболоида:

$$\Delta p(R_u, \alpha, \alpha_1) = R_{UT} \cdot \left[\frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)} - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_{1T}} \right] + \\ + \frac{\Delta R_u}{\operatorname{tg}(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)} ; \quad / 3.40 /$$

- для гиперболоида и эллипсоида:

$$\Delta p(R_u, \alpha, \alpha_1) = R_{UT} \cdot \left\{ \frac{\cos(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)}{\sin[(\alpha_T + \Delta\alpha) + (\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)]} - \frac{\cos \alpha_{1T}}{\sin(\alpha_T + \alpha_{1T})} \right\} + \Delta R_u \cdot \frac{\cos(\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)}{\sin[(\alpha_T + \Delta\alpha) + (\alpha_{1T} + \Delta\alpha_1)]} ; \quad / 3.41 /$$

После подстановки значений Δp из /3.39/, /3.40/, /3.41/ и значений p из /3.10/, /3.12/, /3.17/ в выражение /3.22/ и преобразований соответственно получим:

- для сферы:

$$\varepsilon_p(R_u, \alpha) = \varepsilon_p(R_u) + \varepsilon_p(\alpha) + \varepsilon_p(R_u) \cdot \varepsilon_p(\alpha) ; \quad / 3.42 /$$

- для параболоида:

$$\varepsilon_p(R_u, \alpha_1) = \varepsilon_p(R_u) + \varepsilon_p(\alpha_1) + \varepsilon_p(R_u) \cdot \varepsilon_p(\alpha_1) ; \quad / 3.43 /$$

- для гиперболоида и эллипсоида:

$$\varepsilon_p(R_u, \alpha, \alpha_1) = \varepsilon_p(R_u) + \varepsilon_p(\alpha, \alpha_1) + \varepsilon_p(R_u) \cdot \varepsilon_p(\alpha, \alpha_1) ; \quad / 3.44 /$$

Из анализа видно, что параметры α и α_1 могут компенсировать размерные погрешности, вызванные неточностью параметра R_u .

3.3.6. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА x_0

Пусть $y_0 = 0$; $\beta = 0$, тогда система /3.4/ преобразуется к виду:

$$\begin{cases} x = (\cos \alpha_2) \cdot \bar{x} + x_0 \\ y = \bar{y} \\ z = (\sin \alpha_2) \cdot \bar{x} \end{cases} \quad / 3.45 /$$

После подстановок из выражений /3.3/, /3.5/ и преобразований система /3.45/ сводится к следующему уравнению:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 - z^2 \cdot \frac{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1}{\sin^2 \alpha_2} - \\ - 2z \cdot \frac{x_0 \cdot \cos \alpha_2 + R_u \cdot \cos \alpha_1}{\sin \alpha_2} - x_0 = 0. \end{aligned} \quad / 3.46 /$$

Исследуем уравнение /3.46/.

I. Пусть $\alpha \neq 0$; $\alpha_1 = 0$, тогда $\alpha_2 = \alpha$ и уравнение /3.46/ после преобразований примет вид:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + \left[z - \left(\frac{R_u}{\sin \alpha} + x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha \right) \right]^2 = \\ = \left(\frac{R_u}{\sin \alpha} + x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha \right)^2 + x_0^2. \end{aligned} \quad / 3.47 /$$

Уравнение /3.47/ есть уравнение сферы с радиусом

$$R_{сф} = \sqrt{\left(\frac{R_4}{\sin \alpha} + x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha\right)^2 + x_0^2}, \quad / 3.48 /$$

смещённой вдоль оси OZ на величину $\left(\frac{R_4}{\sin \alpha} + x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha\right)$ в положительном направлении.

2. Пусть $\alpha = 0$; $\alpha_1 \neq 0$, тогда $\alpha_2 = \alpha_1$ и уравнение /3.46/ после преобразований примет вид:

$$x^2 + y^2 = 2 \frac{R_4 + x_0}{\operatorname{tg} \alpha_1} \cdot z + x_0^2. \quad / 3.49 /$$

Уравнение /3.49/ есть уравнение параболоида вращения с фокальным параметром

$$\beta = \frac{R_4 + x_0}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad / 3.50 /$$

имеющим смещение вдоль оси OZ на величину

$$\frac{x_0^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{2(R_4 + x_0)}$$

3. Пусть $\alpha \neq 0$; $\alpha_1 \neq 0$, тогда $\alpha_2 = \alpha + \alpha_1$ и уравнение /3.46/ после преобразований примет вид:

$$\frac{(z + C_1)^2}{A_1^2} + \frac{x^2}{B_1^2} + \frac{y^2}{B_1^2} = 1, \quad / 3.51 /$$

где:

$$A_1^2 = \frac{\sin^2 \alpha_2 \cdot [(x_0 \cdot \cos \alpha_2 + R_4 \cdot \cos \alpha_1)^2 - x_0^2]}{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1} ; / 3.52 /$$

$$B_1^2 = x_0^2 - \frac{(x_0 \cdot \cos \alpha_2 - R_u \cdot \cos \alpha)^2}{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1}; \quad / 3.53 /$$

$$C_1 = \frac{\sin \alpha_2 \cdot (x_0 \cdot \cos \alpha_2 + R_u \cdot \cos \alpha_1)}{\cos^2 \alpha_2 - \cos^2 \alpha_1}. \quad / 3.54 /$$

Если $B_1^2 > 0$, то уравнение /3.51/ есть уравнение гиперboloида вращения, а если $B_1^2 < 0$, то уравнение /3.51/ есть уравнение эллипсоида вращения. Обе поверхности имеют фокальный параметр, определяемый выражением:

$$p = \sqrt{(x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_2 + R_u \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_2})^2 - x_0^2 \cdot (\operatorname{ctg}^2 \alpha_2 - \frac{\cos^2 \alpha_1}{\sin^2 \alpha_2})} \quad / 3.55 /$$

и имеют смещение вдоль оси OZ на величину C_1 .

Из выражений /3.48/, /3.50/, /3.55/ абсолютная погрешность фокального параметра определяется соответственно следующими выражениями:

- для сферы:

$$\Delta p(x_0) = \sqrt{\left(\frac{R_u}{\sin \alpha} + x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha\right)^2 + x_0^2} - \frac{R_u}{\sin \alpha}; \quad / 3.56 /$$

- для параболоида:

$$\Delta p(x_0) = \frac{x_0}{\operatorname{tg} \alpha_1}; \quad / 3.57 /$$

- для гиперboloида и эллипсоида:

$$\Delta p(x_0) = \sqrt{(x_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_2 + R_u \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_2})^2 - x_0^2 \cdot (\operatorname{ctg}^2 \alpha_2 - \frac{\cos^2 \alpha_1}{\sin^2 \alpha_2})} - R_u \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad / 3.58 /$$

После подстановки значений $\Delta\rho$ из /3.56/, /3.57/, /3.58/ и значений ρ из /3.10/, /3.12/, /3.17/ в выражение /3.22/ и преобразований соответственно получим:

- для сферы:

$$\varepsilon_{\rho}(x_0) = \sqrt{\left(1 + \frac{x_0}{R_u} \cdot \operatorname{ctg} \alpha\right)^2 + \frac{x_0^2}{R_u^2} \cdot \sin^2 \alpha} - 1; \quad / 3.59 /$$

- для параболоида:

$$\varepsilon_{\rho}(x_0) = \frac{x_0}{R_u}; \quad / 3.60 /$$

- для гиперболоида и эллипсоида:

$$\varepsilon_{\rho}(x_0) = \sqrt{\left(\frac{x_0}{R_u} \cdot \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} + 1\right)^2 - \frac{x_0^2}{R_u^2} \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \alpha_1} - 1\right)} - 1. \quad / 3.61 /$$

Таким образом, параметр x_0 оказывает влияние только на точность размера обработанной поверхности. Кроме этого необходимо отметить, что при обработке сплошной поверхности в центре изделия остаётся выступ диаметром $2x_0$.

3.3.7. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ y_0 И β .

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Если параметры $y_0 \neq 0$ и $\beta \neq 0$ или какой-либо один из этих параметров отличен от нуля, то система /3.4/ сводится к уравнениям, которые не преобразуются к удобному для анализа виду. Поэтому анализ влияния параметров y_0 и β на точность обработанной поверхности произведён на ЭВМ ЕС-1022 по специально составленной программе

/см. приложение/.

Исходные данные для расчёта на ЭВМ приняты в соответствии с возможностями обработки на станке мод. МК 6514, а именно:

$$R_u = 300 \text{ мм};$$

$$p_r = 1, 5, 10, 20, 40 \text{ м};$$

$$\alpha_1 = 0^\circ, 10^\circ;$$

$$y_{\max} = 50, 100, 150, 200, 250 \text{ мм};$$

$$y_0 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм};$$

$$\beta = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ сек.}$$

Точность формы обработанной поверхности удобно определять величиной отклонения от ближайшей идеальной поверхности /плоскости, сферы, параболоида, гиперboloида или эллипсоида/, фокальный параметр которой определяется из условия прохождения образующей ближайшей идеальной поверхности соответствующего вида через крайние точки профиля обработанной поверхности, а также через начало координат 0 /рис.3.5/.

Фокальный параметр ближайшей идеальной поверхности определяется по формуле [2]:

$$p_d = \frac{z_{\max}^2 - q \cdot z_{\max}^2}{2z_{\max}}, \quad / 3.62 /$$

где: z_{\max} , z_{\max} - координаты крайней точки профиля обработанной поверхности в диаметральном сечении,

$$q = e^2 - 1. \quad / 3.63 /$$

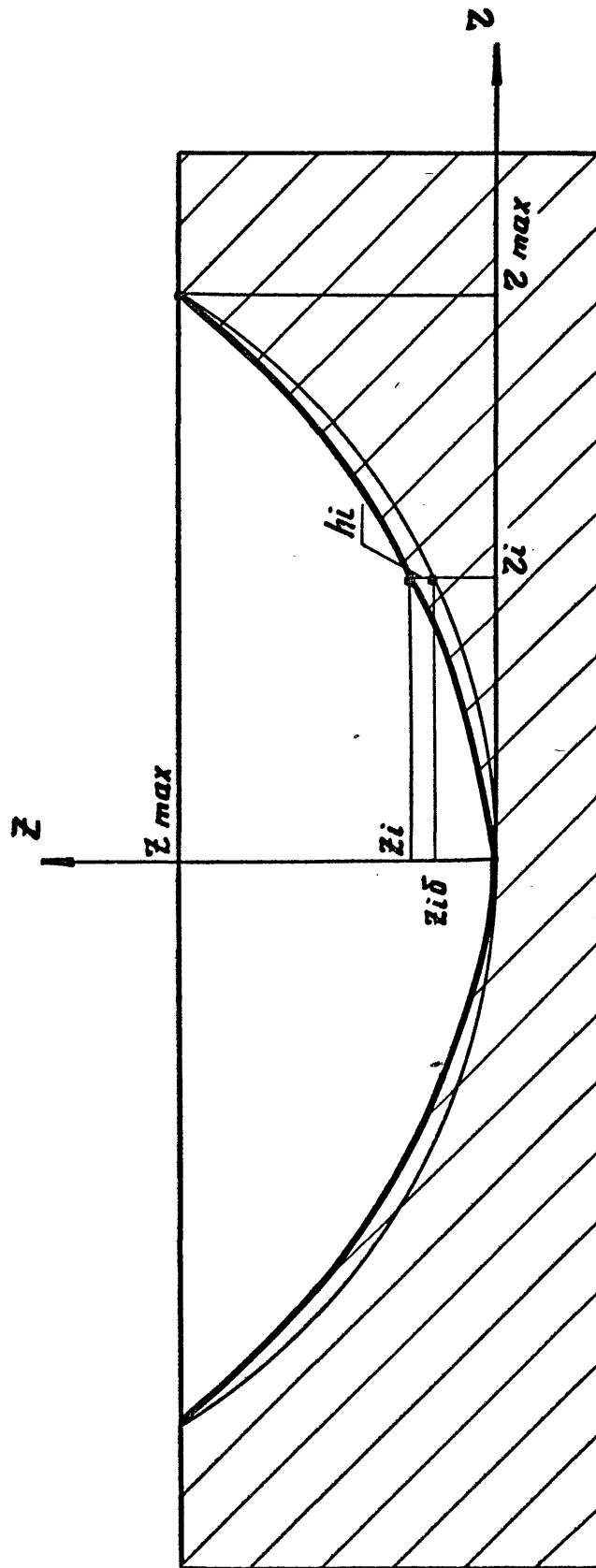


Рис. 3.5. Схема определения погрешности формы и размера обработанной поверхности.

Погрешность формы обработанной поверхности в данной точке определяется выражением:

$$h_i = z_i - z_{i\delta}, \quad / 3.64 /$$

где:

$$z_{i\delta} = \frac{1}{q} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_\delta} + \sqrt{\rho_\delta^2 + q \cdot z_i^2} \right) \quad / 3.65 /$$

На рис. 3.6 и 3.7 показаны типичные графики отклонений профиля обработанной поверхности от ближайшей идеальной поверхности соответственно при $y_0 \neq 0$ и $\beta \neq 0$.

На практике, при проектировании и эксплуатации оборудования для обработки рассматриваемых поверхностей удобно пользоваться значениями наибольших отклонений h_{max} от ближайшей идеальной поверхности. Машинный анализ показал, что величина h принимает значение h_{max} на расстоянии $r = 0,25D$ от начала координат 0.

Условимся, что безразмерная величина наибольших отклонений h_{max} определяется по формуле:

$$\varepsilon_{h_{max}} = 4 \frac{h_{max}}{D}, \quad / 3.66 /$$

где: h_{max} - наибольшее значение погрешности h формы обработанной поверхности,

D - наружный диаметр обработанной поверхности.

Величина $\varepsilon_{h_{max}}$ определяет точность формы обработанной поверхности в угловых единицах / радианах/.

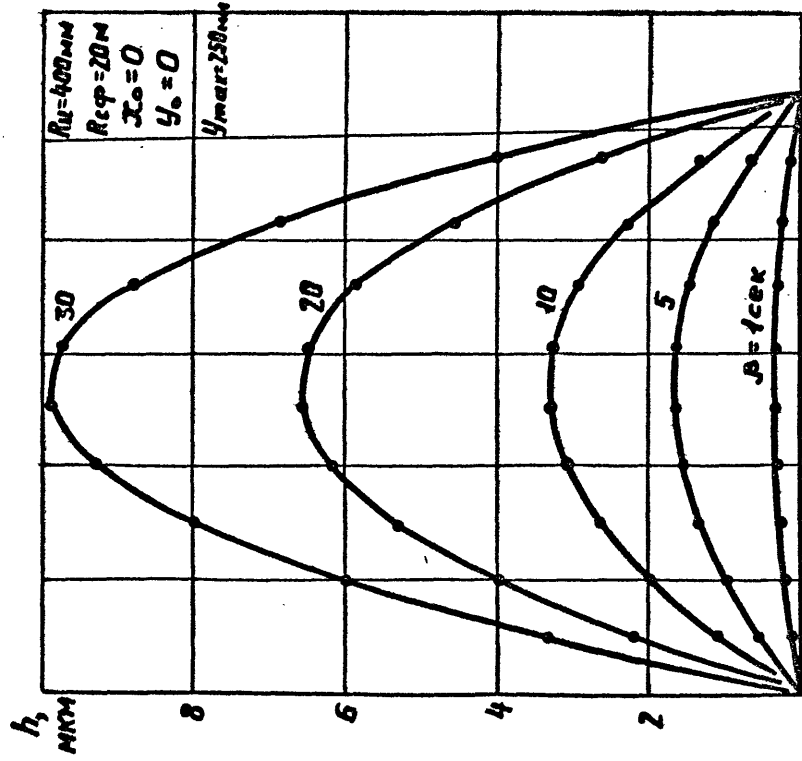


Рис. 3.7. Графики отклонений профиля

обработанной поверхности от
сферы.

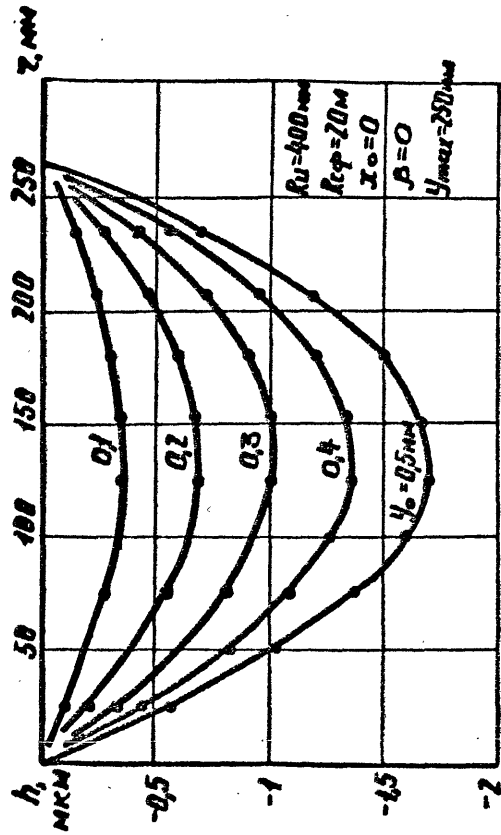


Рис. 3.6. Графики отклонений профиля

обработанной поверхности от
сферы.

3.3.8. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА y_0

На рис.3.8 и 3.9 приведены графики безразмерных величин наибольших отклонений ϵ_{hmax} при $y_0 \neq 0$ справедливые для всех поверхностей второго порядка и диаметра обработанной поверхности до 530 мм с погрешностью не более 4,5%.

На рис.3.10 и 3.11 приведены графики относительной погрешности фокального параметра ϵ_p при $y_0 \neq 0$ справедливые для всех поверхностей второго порядка и фокального параметра p от 1 до 40 метров с погрешностью менее 0,1%.

Из графиков видно, что параметр y_0 оказывает влияние и на точность формы и на точность размера обработанной поверхности. Причём точность формы зависит также от фокального параметра обработанной поверхности и с уменьшением величины фокального параметра безразмерная величина наибольших отклонений ϵ_{hmax} увеличивается. А точность размера зависит также от диаметра обработанной поверхности и с уменьшением этого диаметра относительная погрешность фокального параметра ϵ_p увеличивается.

Из проведённого анализа видно, что зависимости $\epsilon_{hmax}(y_0)$ и $\epsilon_p(y_0)$ от y_0 , p , D имеют вид близкий либо к прямой пропорциональности /линейная зависимость/, либо к обратной пропорциональности /гиперболическая зависимость/. Это объясняется тем, что значения параметра y_0 незначительно отличаются от нуля и соответствуют угловым смещениям осей координат системы $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$

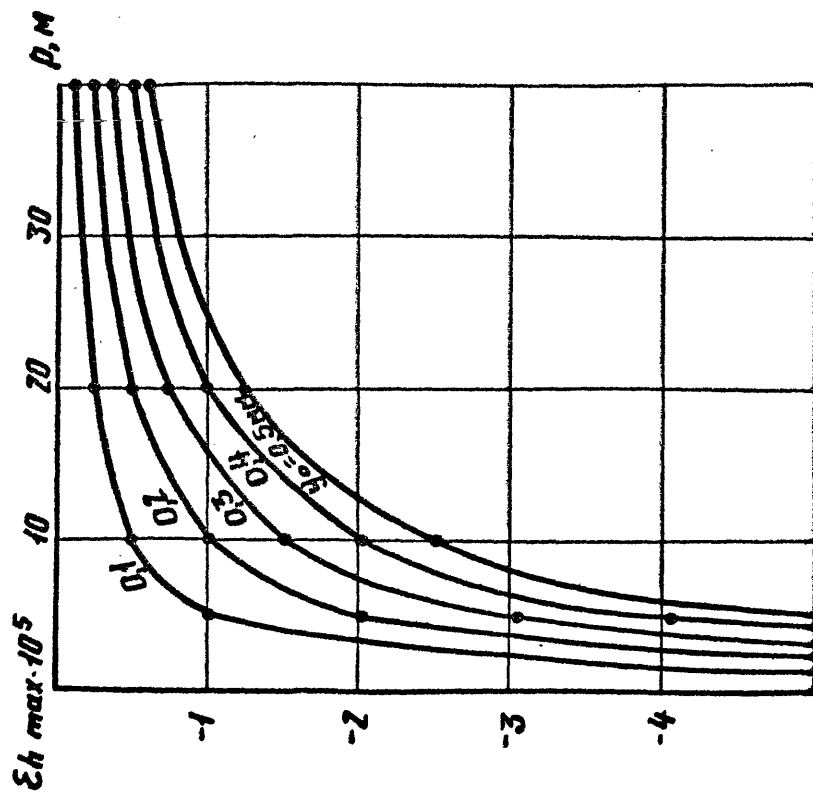


Рис. 3.9. Зависимости Σh_{max} от

ρ и γ_0 .

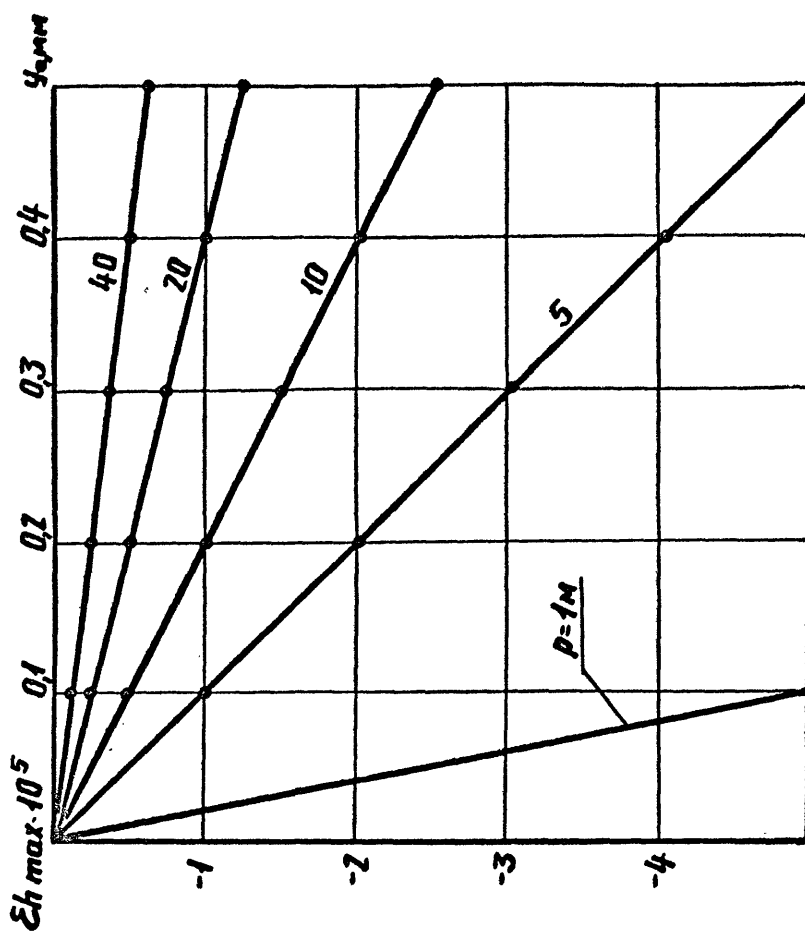


Рис. 3.8. Зависимости Σh_{max} от ρ и p .

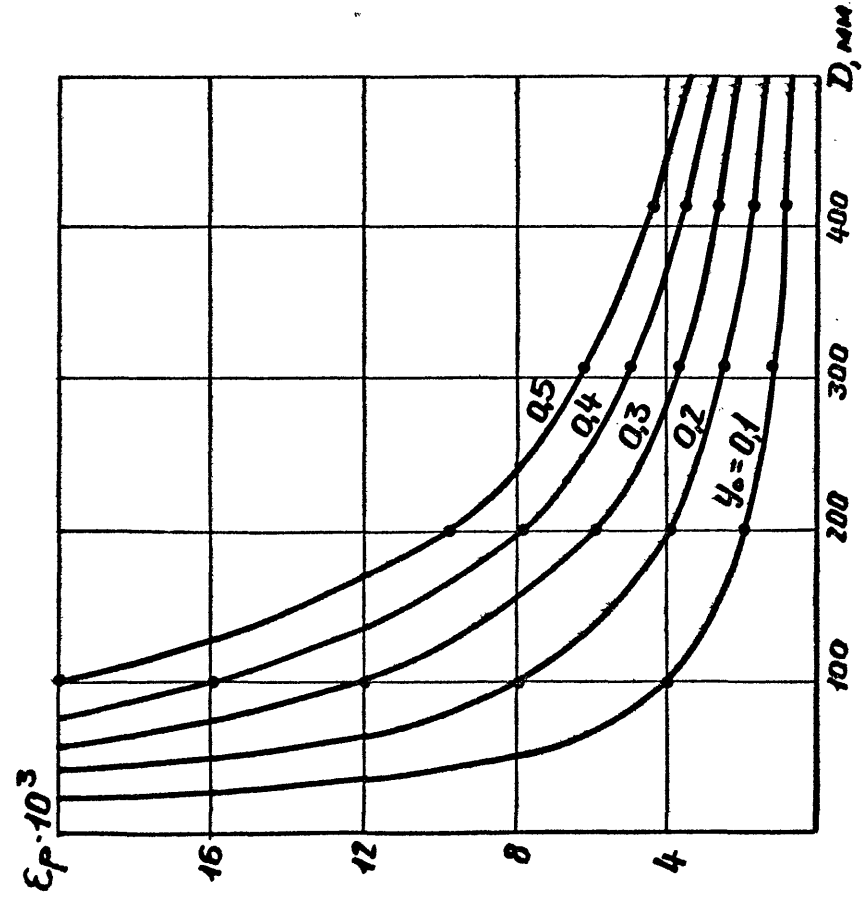


Рис. 3.11. Зависимости ϵ_p от D и γ_0 .

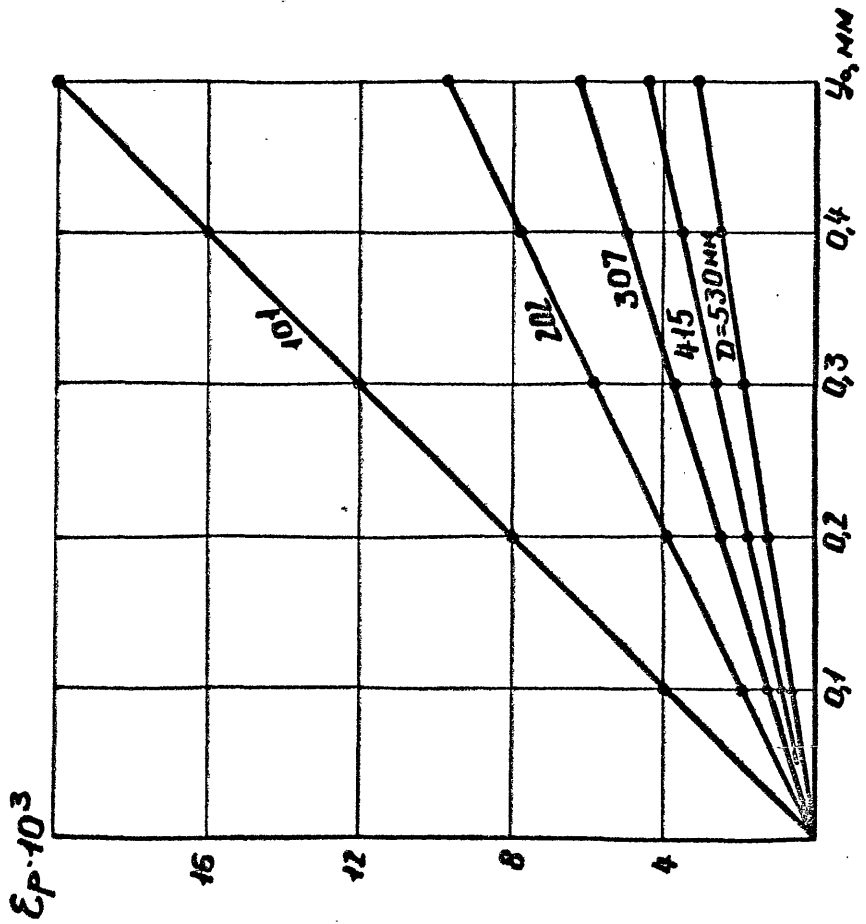


Рис. 3.10. Зависимости ϵ_p от γ_0 и D .

относительно системы $OXYZ$ не более 17 угловых минут.

Поэтому можно определить простые выражения для инженерного расчёта значений $\varepsilon_{hmax}(y_0)$ и $\varepsilon_{\rho}(y_0)$, которые приведены в таблице 3.2. Погрешность расчётов по этим формулам в исследованных граничных условиях не превышает: для ε_{hmax} - 5,5%, для ε_{ρ} - 10%.

3.3.9. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА β

На рис.3.12 приведён график безразмерных величин наибольших отклонений ε_{hmax} при $\beta \neq 0$ справедливый для всех поверхностей второго порядка с фокальным параметром от 1 до 40 метров и диаметров обработанной поверхности до 530 мм с погрешностью не более 5,5%.

На рис.3.13 - 3.27 приведены графики относительной погрешности фокального параметра ε_{ρ} при $\beta \neq 0$ справедливые для всех поверхностей второго порядка с погрешностью не более 1%.

Из графиков видно, что параметр β оказывает влияние и на точность формы и на точность размера обработанной поверхности. Причём точность размера зависит также от фокального параметра /с увеличением фокального параметра ρ модуль относительной погрешности фокального параметра $|\varepsilon_{\rho}|$ увеличивается/ и от диаметра обработанной поверхности /с увеличением диаметра D модуль относительной погрешности фокального параметра $|\varepsilon_{\rho}|$ уменьшается/.

Из проведённого анализа видно, что зависимости $\varepsilon_{hmax}(\beta)$ и $\varepsilon_{\rho}(\beta)$ от β , ρ , D имеют вид близкий

Погрешность обработки и параметры настройки

Таблица 3.2

| Относительная погрешность | Обрабатываемая поверхность | | |
|---|---|---|---|
| | Сфера | Параболоид | Эллипсоид |
| $\epsilon_p(Ru)$ | $\epsilon_{Ru} = \frac{\Delta Ru}{R_{ит}}$ | | |
| $\epsilon_p(\alpha, \alpha_1)$ | $\frac{\sin \alpha}{\sin[\alpha r(1+\epsilon_\alpha)]} - 1$ | $\frac{\text{ctg}[\alpha r(1+\epsilon_\alpha)]}{\text{ctg} \alpha r} - 1$ | $\frac{\cos[\alpha r(1+\epsilon_\alpha)] \cdot \sin(\alpha r \cdot \alpha_1) - 1}{\sin[\alpha r(1+\epsilon_\alpha) + \alpha_1 r(1+\epsilon_\alpha)] \cdot \cos \alpha r}$ |
| $\epsilon_p(Ru, \alpha, \alpha_1)$ | $\epsilon_p(Ru) \cdot \epsilon_p(\alpha) \cdot \epsilon_p(Ru) \cdot \epsilon_p(\alpha)$ | $\epsilon_p(Ru) \cdot \epsilon_p(\alpha) + \epsilon_p(Ru) \cdot \epsilon_p(\alpha_1)$ | $\epsilon_p(Ru) \cdot \epsilon_p(\alpha, \alpha_1) + \epsilon_p(Ru) \cdot \epsilon_p(\alpha, \alpha_1)$ |
| $\epsilon_p(x_0)$ | $\sqrt{\left(1 + \frac{x_0 \cdot \cos \alpha}{Ru}\right)^2 + \frac{x_0^2}{Ru^2} \cdot \sin^2 \alpha} - 1$ | $\frac{x_0}{Ru}$ | $\sqrt{\left(\frac{x_0 \cdot \cos \alpha}{Ru}\right)^2 + \frac{x_0^2}{Ru^2} \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \alpha} - 1\right)} - 1$ |
| $\epsilon_p(y_0)$ | | $3,687 \cdot \frac{y_0}{D}$ | |
| $\epsilon_p(\beta)$ | | $3,687 \cdot \frac{p \cdot \beta}{D}$ | |
| $\epsilon_p(y_0, \beta)$ | | $3,687 \cdot \frac{y_0 \cdot p \cdot \beta}{D}$ | |
| $\epsilon_p(Ru, \alpha, \alpha_1, x_0, y_0, \beta)$ | $\epsilon_p(Ru, \alpha) \cdot \epsilon_p(x_0) + \epsilon_p(y_0, \beta)$ | $\epsilon_p(Ru, \alpha) + \epsilon_p(x_0) + \epsilon_p(y_0, \beta)$ | $\epsilon_p(Ru, \alpha, \alpha_1) + \epsilon_p(x_0) + \epsilon_p(y_0, \beta)$ |
| $\epsilon_{h \max}(y_0)$ | | $0,505 \frac{y_0}{p}$ | |
| $\epsilon_{h \max}(\beta)$ | | $0,505 \beta$ | |
| $\epsilon_{h \max}(y_0, \beta)$ | | $0,505 \left(\beta - \frac{y_0}{p}\right)$ | |

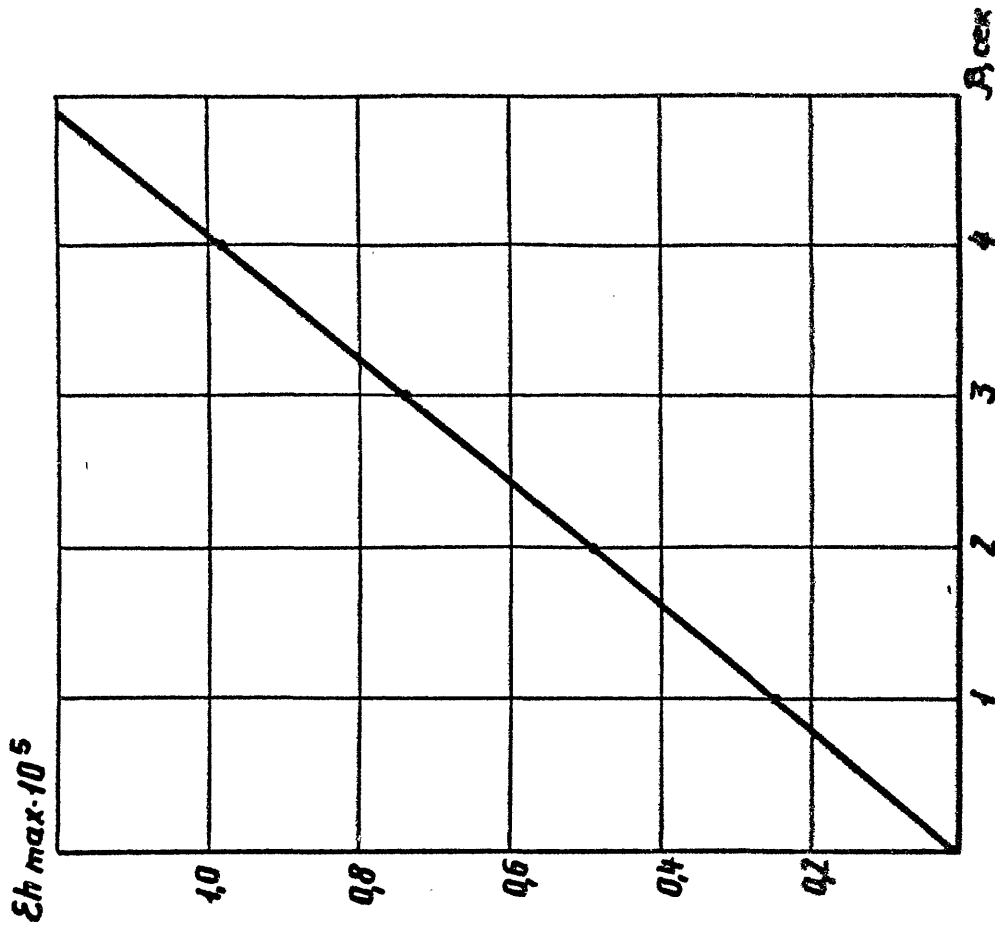


Рис. 3.12. Зависимости ϵh_{max} от t .

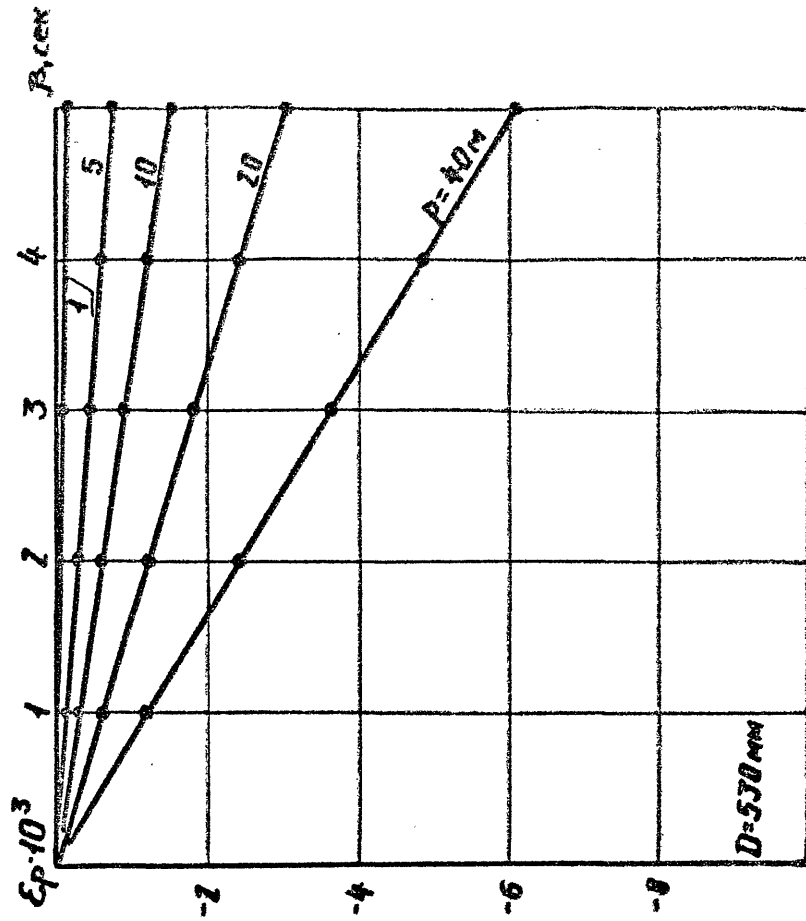


Рис. 3.13. Зависимости ϵ_p от t и P

при $D = 530$ мм.

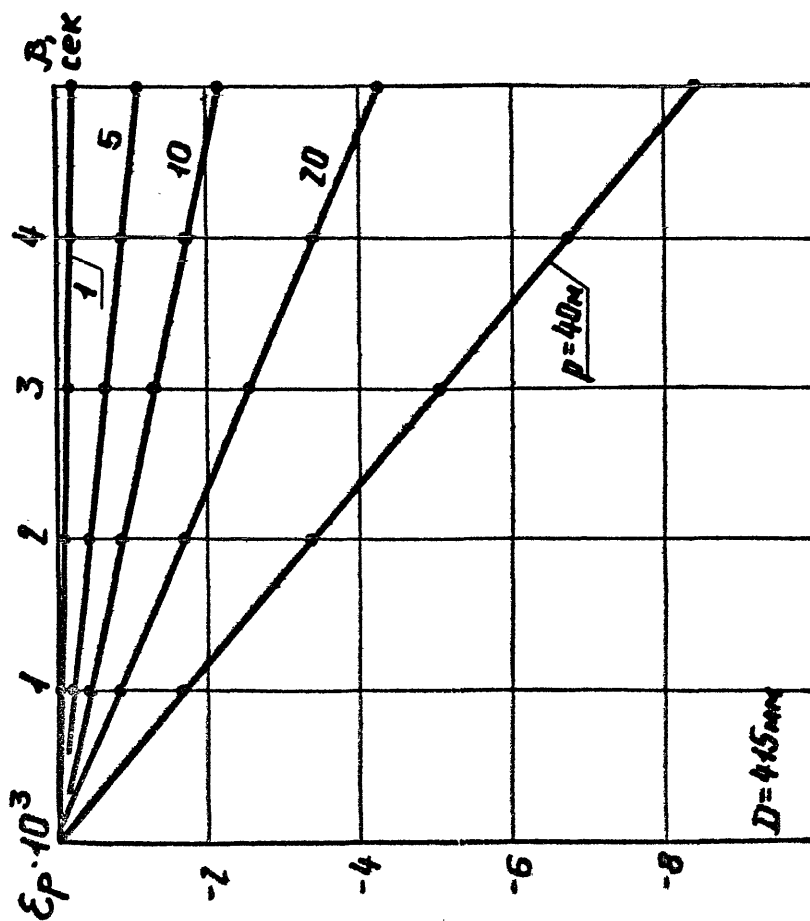
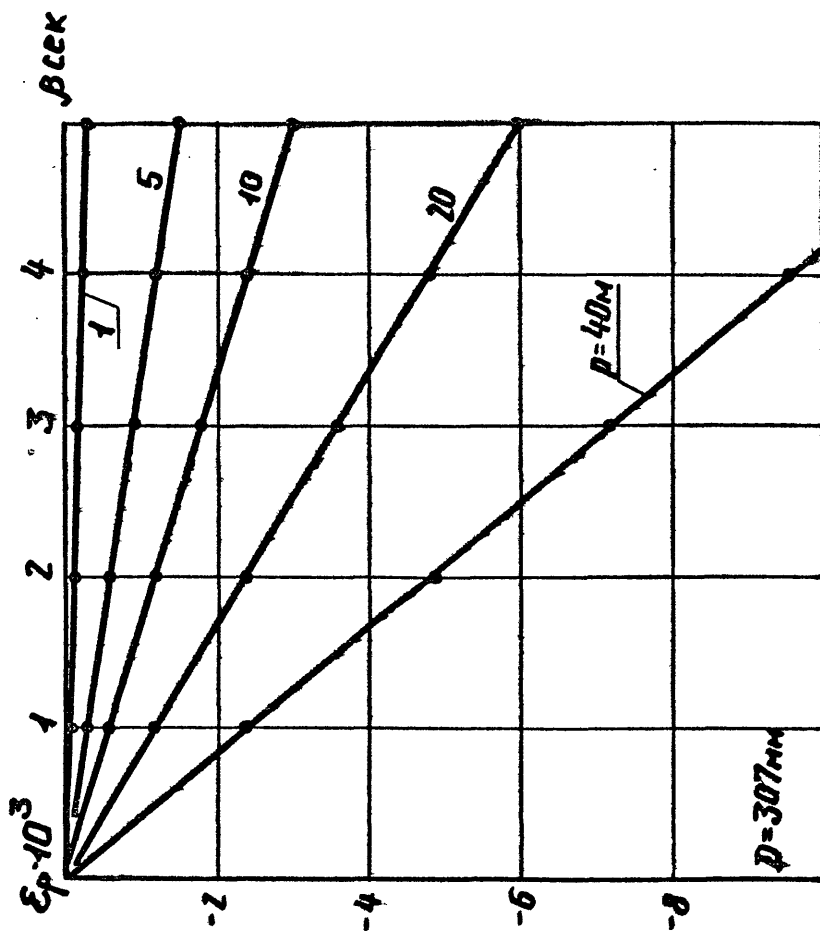


Рис. 3.15. Зависимости ϵ_p от t и p

при $D = 307$ мм.

Рис. 3.14. Зависимости ϵ_p от t и p

при $D = 415$ мм.

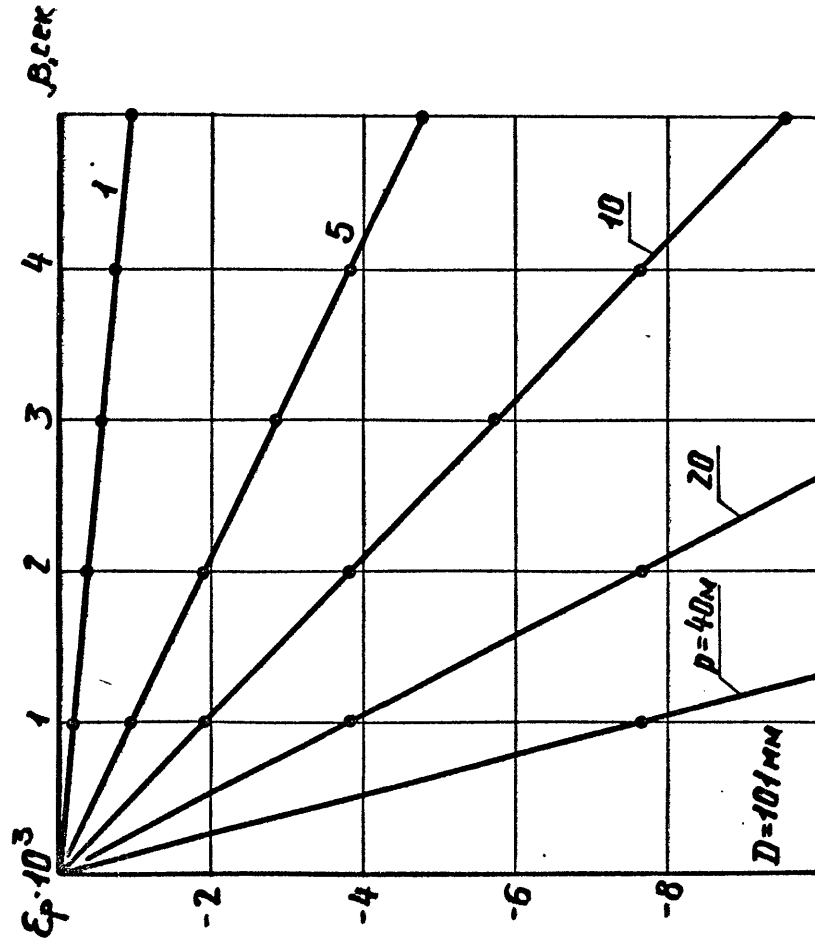


Рис. 3.17. Зависимости ϵ_p от β и p

при $D = 101$ мм.

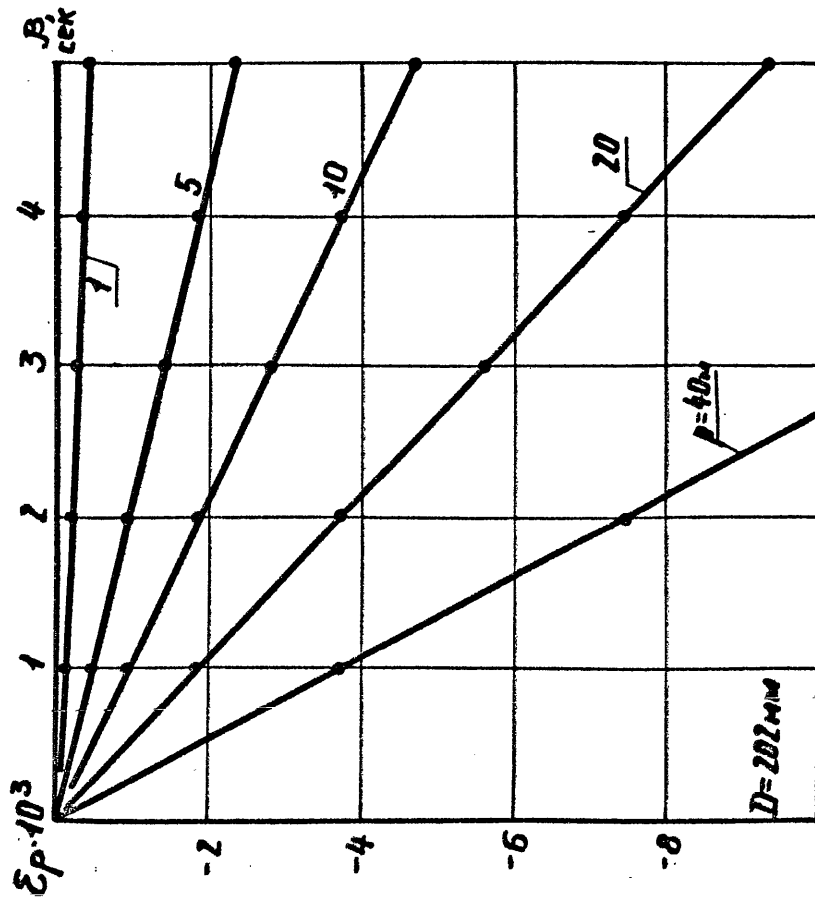


Рис. 3.16. Зависимости ϵ_p от β и p

при $D = 202$ мм.

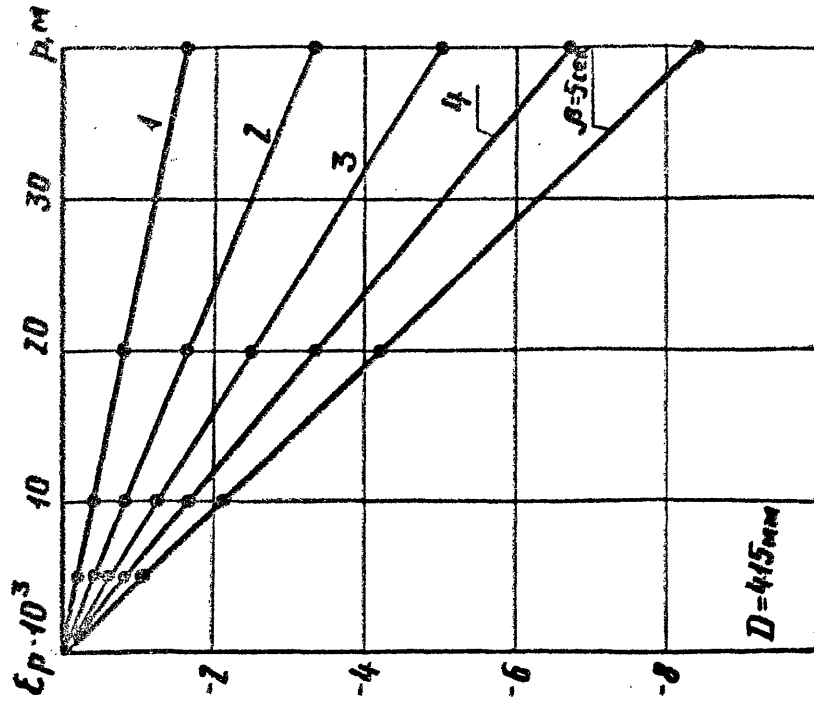


Рис. 3.19. Зависимость ϵ_p от p и β
при $D = 415 \text{ мм}$.

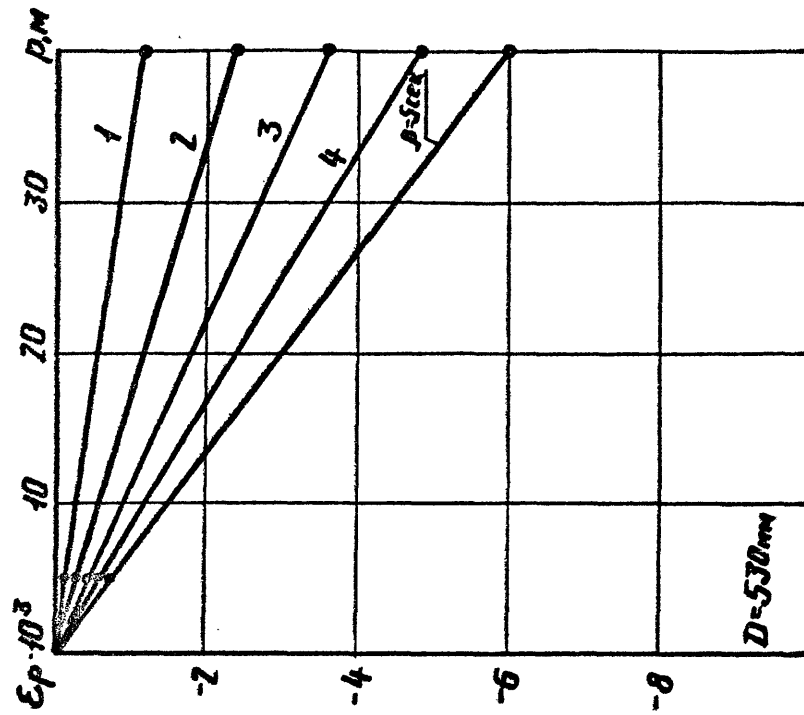


Рис. 3.18. Зависимость ϵ_p от p и β
при $D = 530 \text{ мм}$.

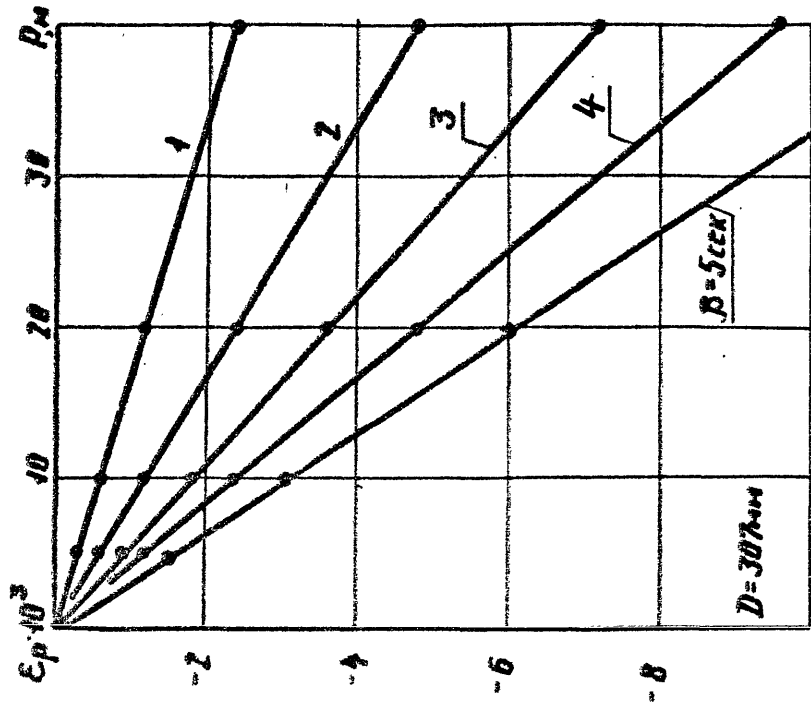
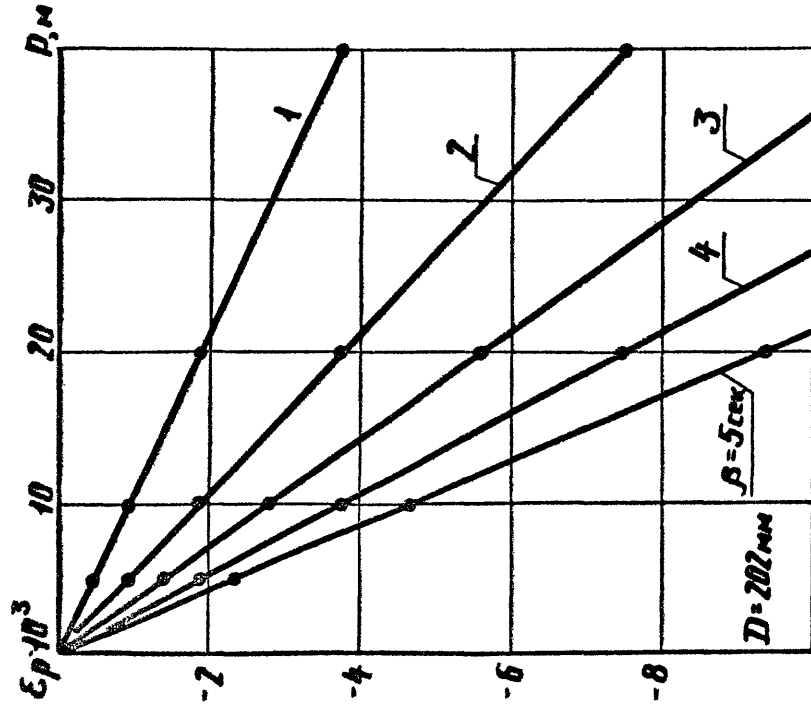


Рис. 3.21. Зависимости ϵ_p от p и β

при $D = 202 \text{ мм}$.

Рис. 3.20. Зависимости ϵ_p от p и β

при $D = 307 \text{ мм}$.

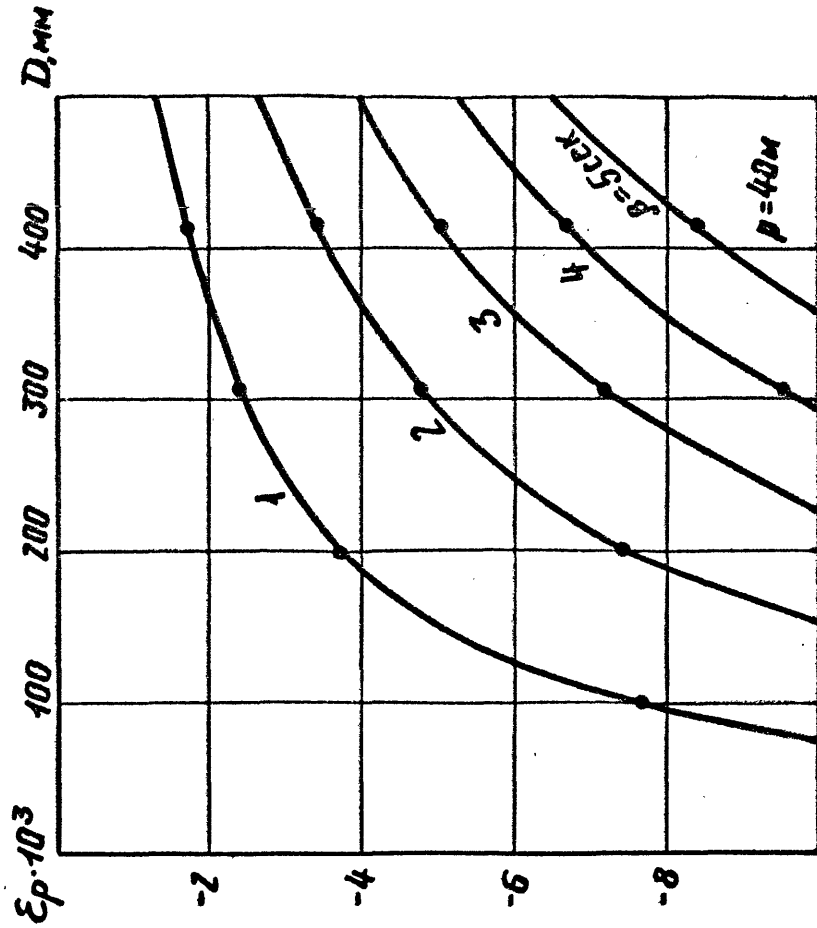


Рис. 3.23. Зависимости ϵ_p от D и β

при $\beta = 40$ м.

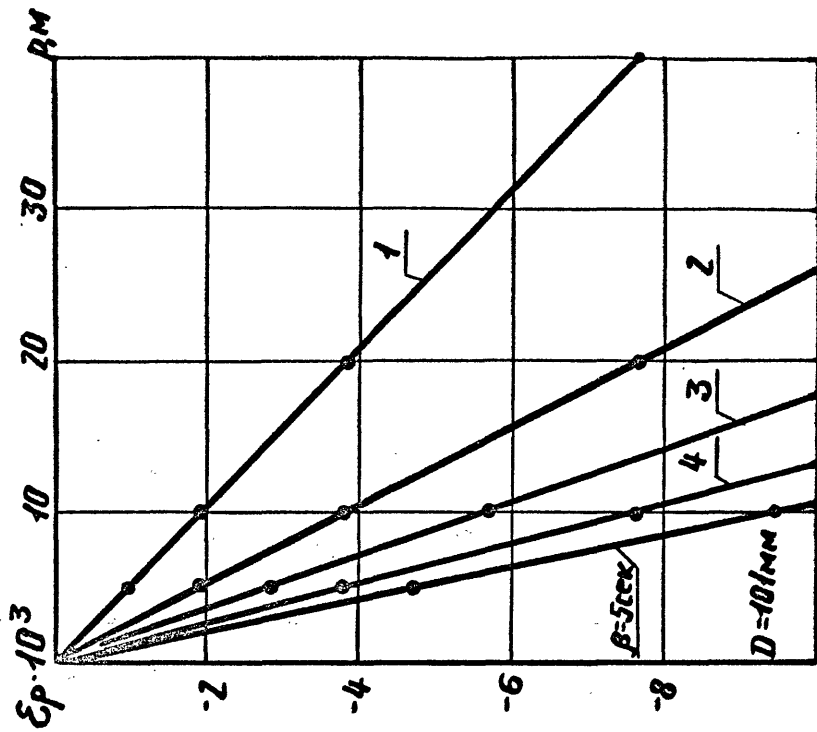


Рис. 3.22. Зависимости ϵ_p от β и D

при $D = 10$ мм.

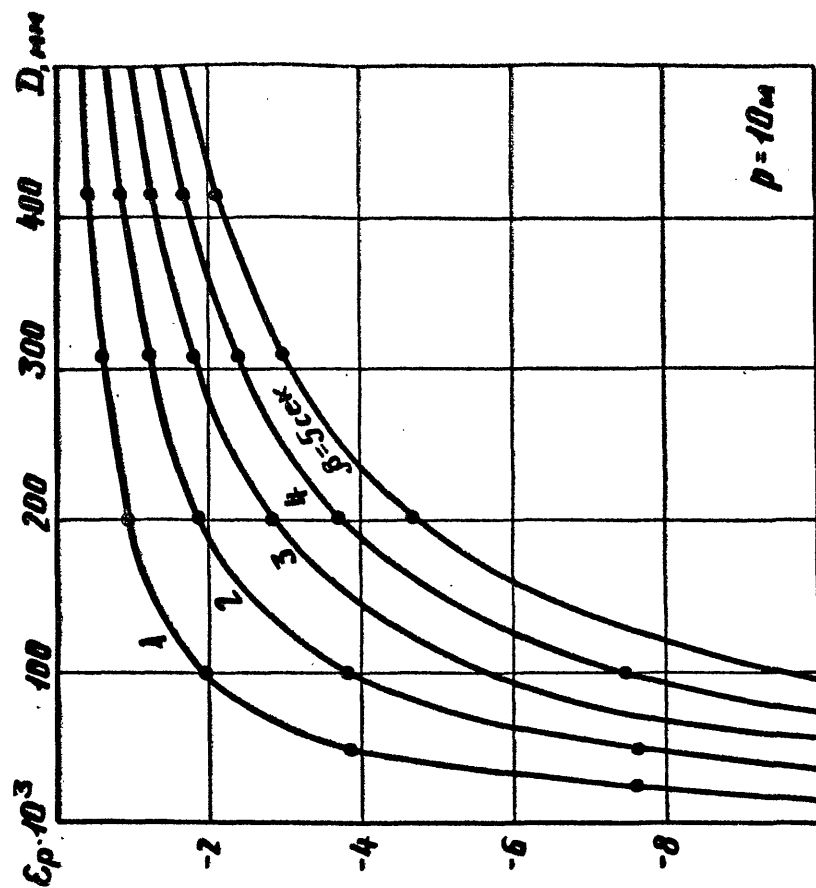


Рис. 3.25. Зависимости ϵ_p от D и β при $\rho = 10$ м.

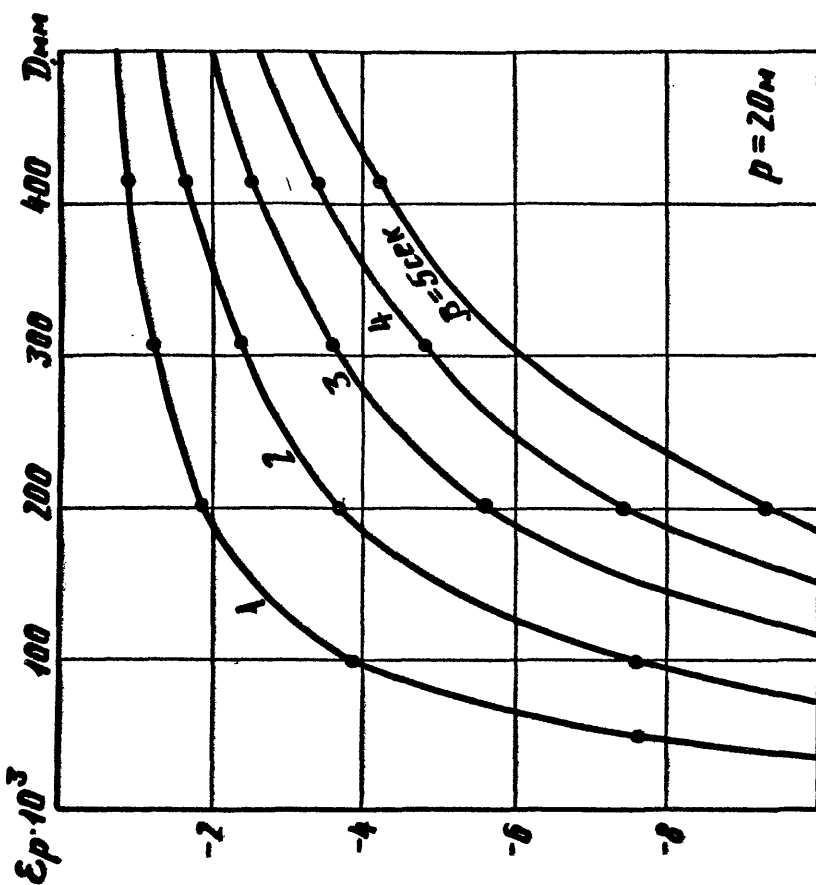


Рис. 3.24. Зависимости ϵ_p от D и β при $\rho = 20$ м.

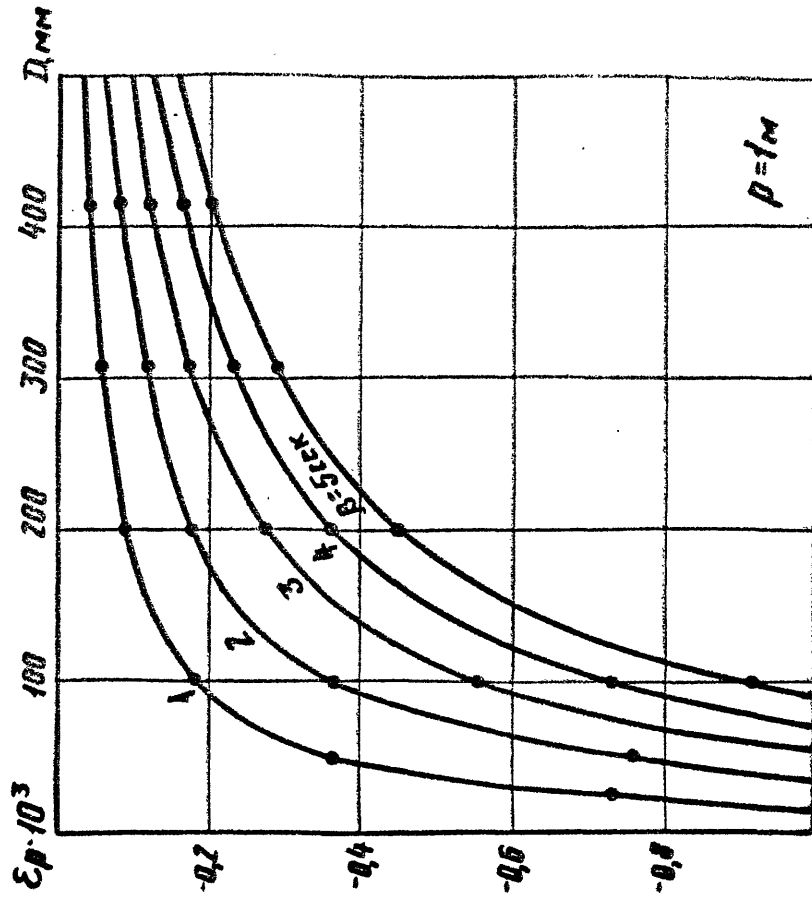


Рис. 3.27. Зависимости ϵ_p от D и β

при $\rho = 1$ м.

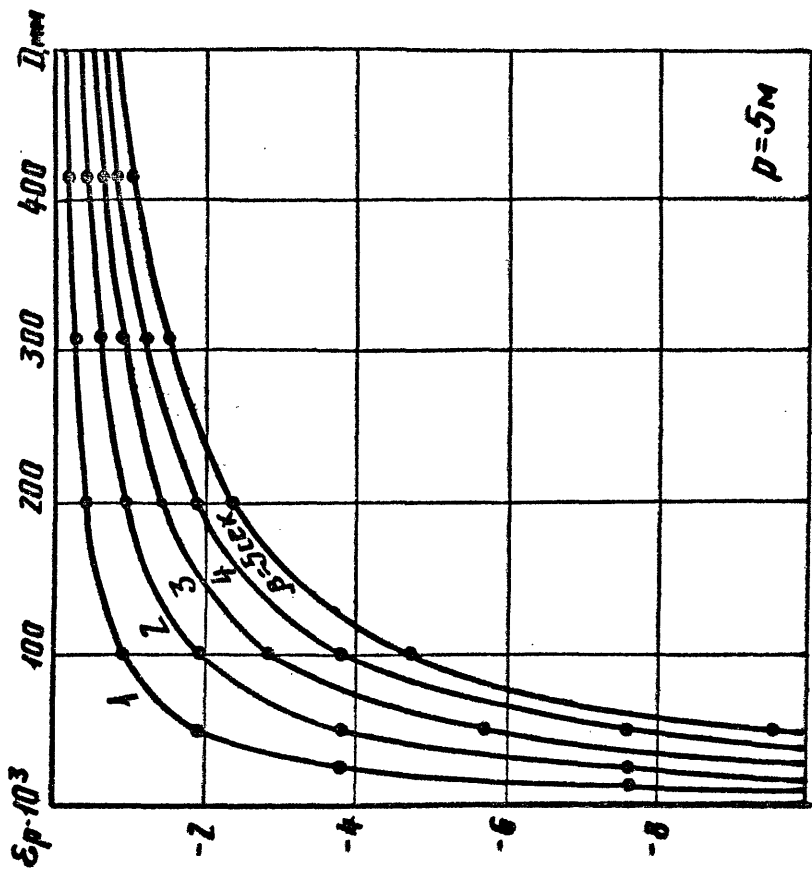


Рис. 3.26. Зависимости ϵ_p от D и β

при $\rho = 5$ м.

либо к прямой пропорциональности, либо к обратной пропорциональности. Это объясняется тем, что параметр β принимает значения не более 5 угловых секунд.

Поэтому можно определить простые выражения для инженерного расчёта значений $E_{h_{max}}(\beta)$ и $E_{\rho}(\beta)$, которые приведены в таблице 3.2. Погрешность расчётов по этим формулам в исследованных граничных условиях не превышает: для $E_{h_{max}}$ - 5,5%, для E_{ρ} - 10%.

3.3.10. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ y_0 И β

На рис.3.28 - 3.37 приведены графики безразмерных величин наибольших отклонений $E_{h_{max}}$ при $y_0 \neq 0$ и $\beta \neq 0$ справедливые для всех поверхностей второго порядка и диаметров обработанной поверхности до 530 мм с погрешностью не более 4,5%.

На рис.3.38 - 3.41 приведены характерные графики относительной погрешности фокального параметра E_{ρ} при $y_0 \neq 0$ и $\beta \neq 0$ справедливые для всех поверхностей второго порядка с погрешностью не более 2%.

Анализ показывает, что зависимости $E_{h_{max}}(y_0, \beta)$ /рис.3.28 - 3.37/ и зависимости $E_{\rho}(y_0, \beta)$ /рис.3.38 - 3.41/ от y_0 , β , ρ , D получены в результате алгебраического сложения зависимостей $E_{h_{max}}(y_0)$ /рис.3.3, 3.9/, $E_{\rho}(y_0)$ /рис.3.10, 3.11/ с зависимостями $E_{h_{max}}(\beta)$ /рис.3.12/, $E_{\rho}(\beta)$ /рис.3.13 - 3.27/ соответственно.

Анализ показывает также, что параметры y_0 и β взаимно компенсируют как погрешности формы, так и погрешности размера обработанной поверхности. Это очень важное

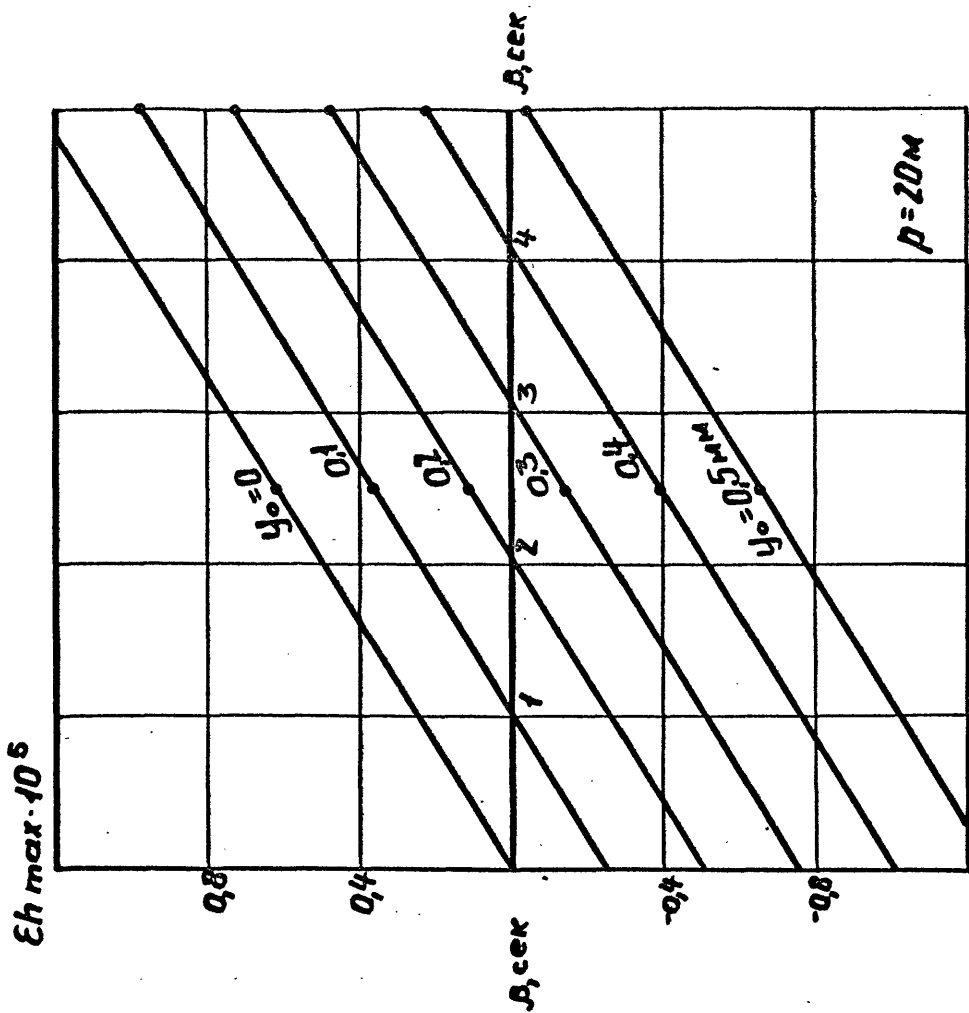


Рис. 3.29. Зависимости Eh_{max} от β и y_0 при $p = 20 \text{ м}$.

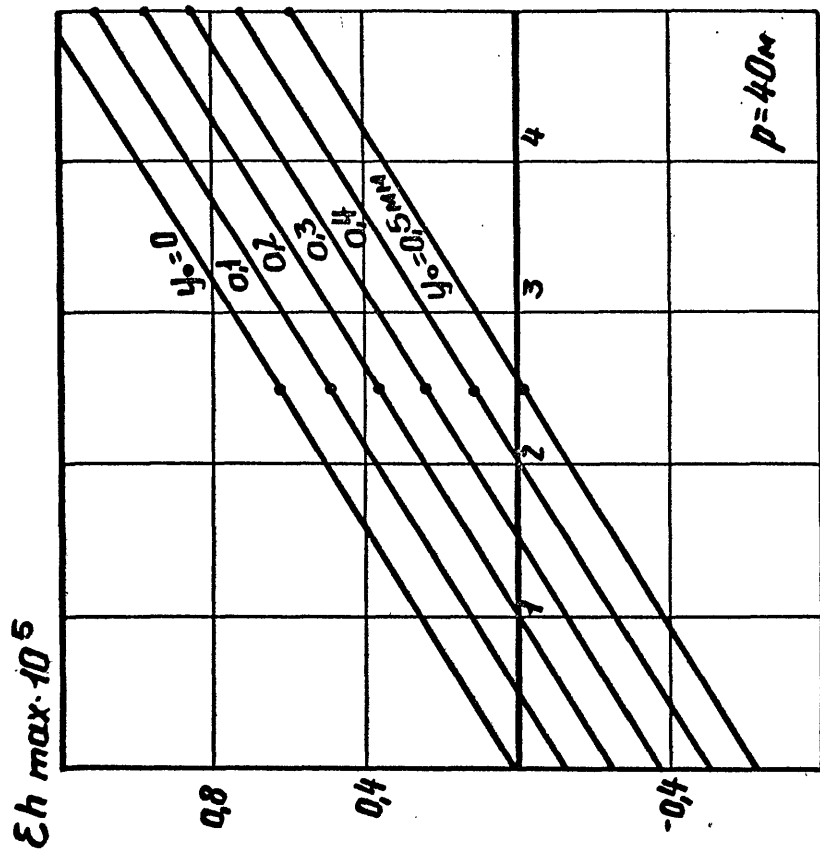


Рис. 3.28. Зависимости Eh_{max} от β и y_0 при $p = 40 \text{ м}$.

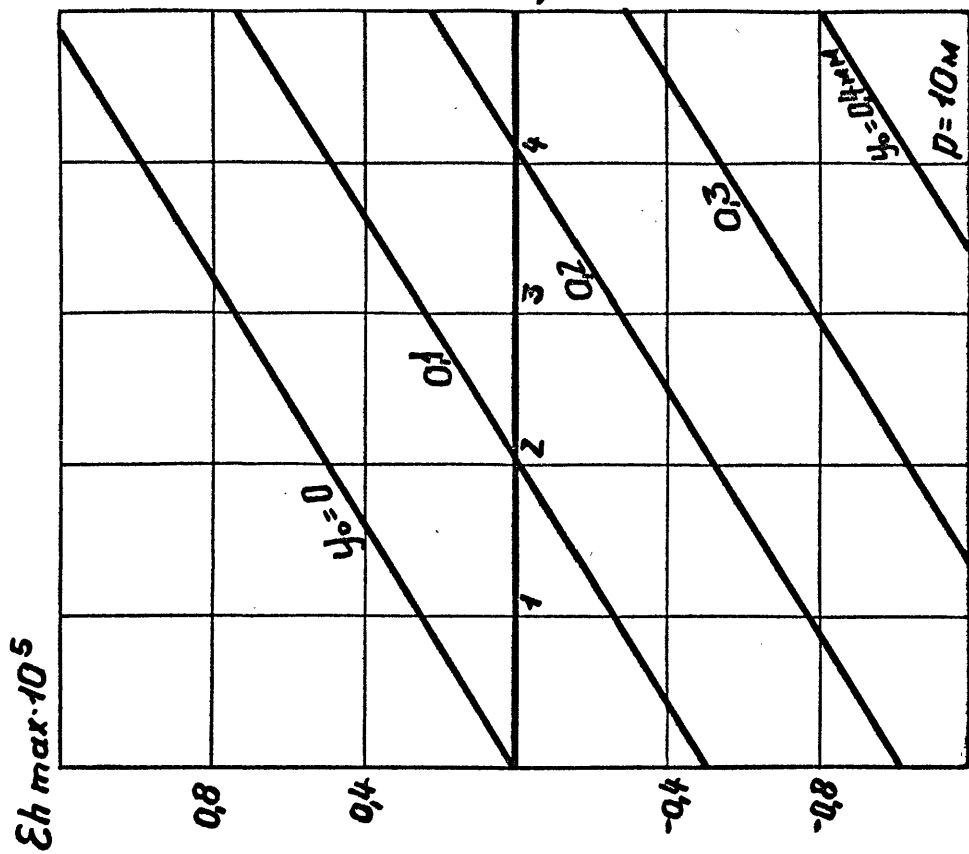


Рис. 3.30. Зависимости Eh_{max} от β
и y_0 при $r = 10$ м.

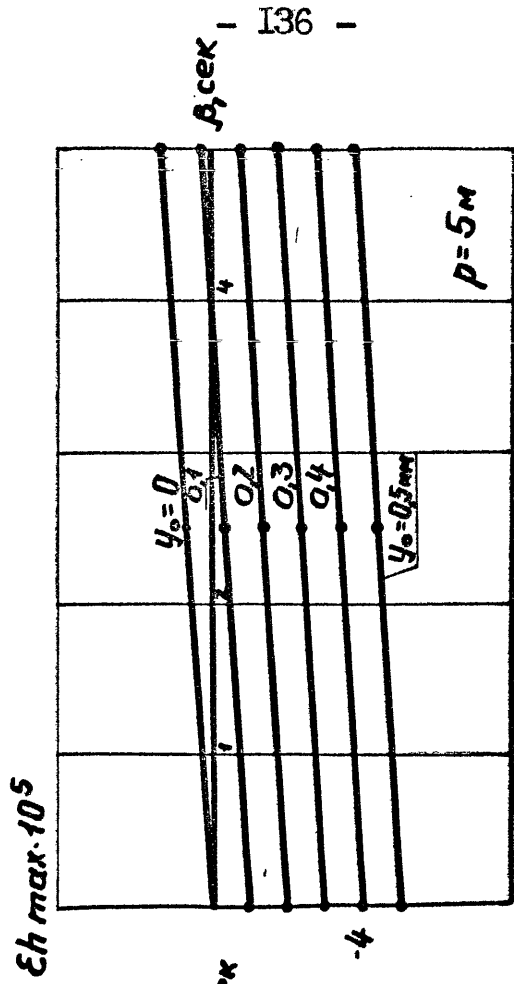


Рис. 3.31. Зависимости Eh_{max} от β
и y_0 при $r = 5$ м.

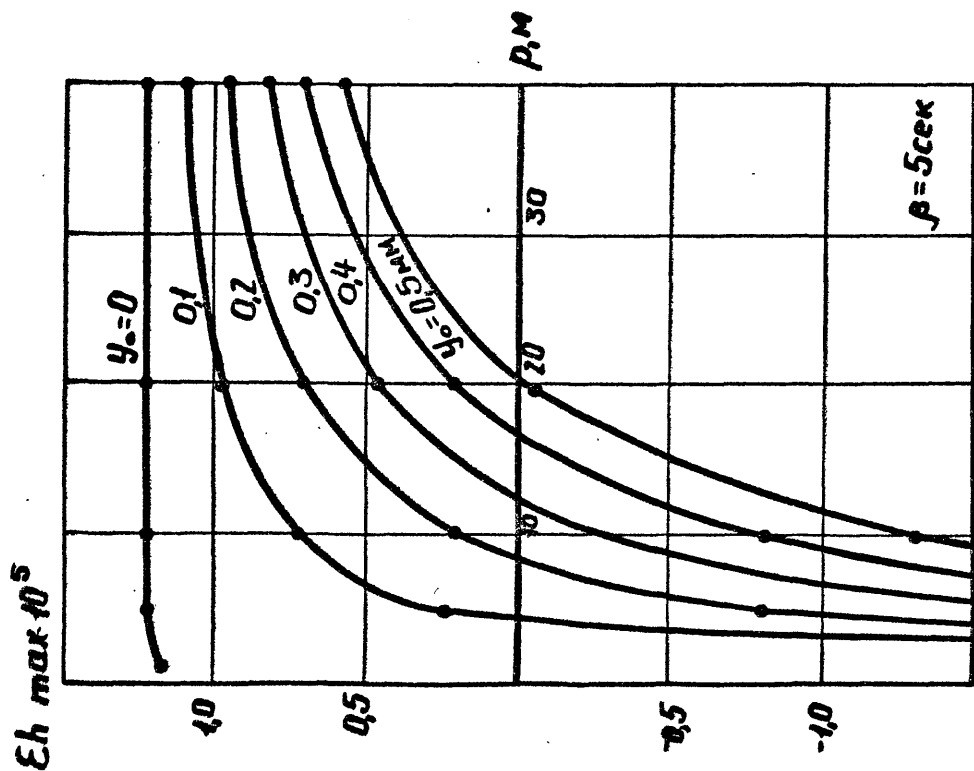


Рис. 3.33. Зависимости $\epsilon_{h \max}$ от ρ и y_0 при $\beta = 5$ сек.

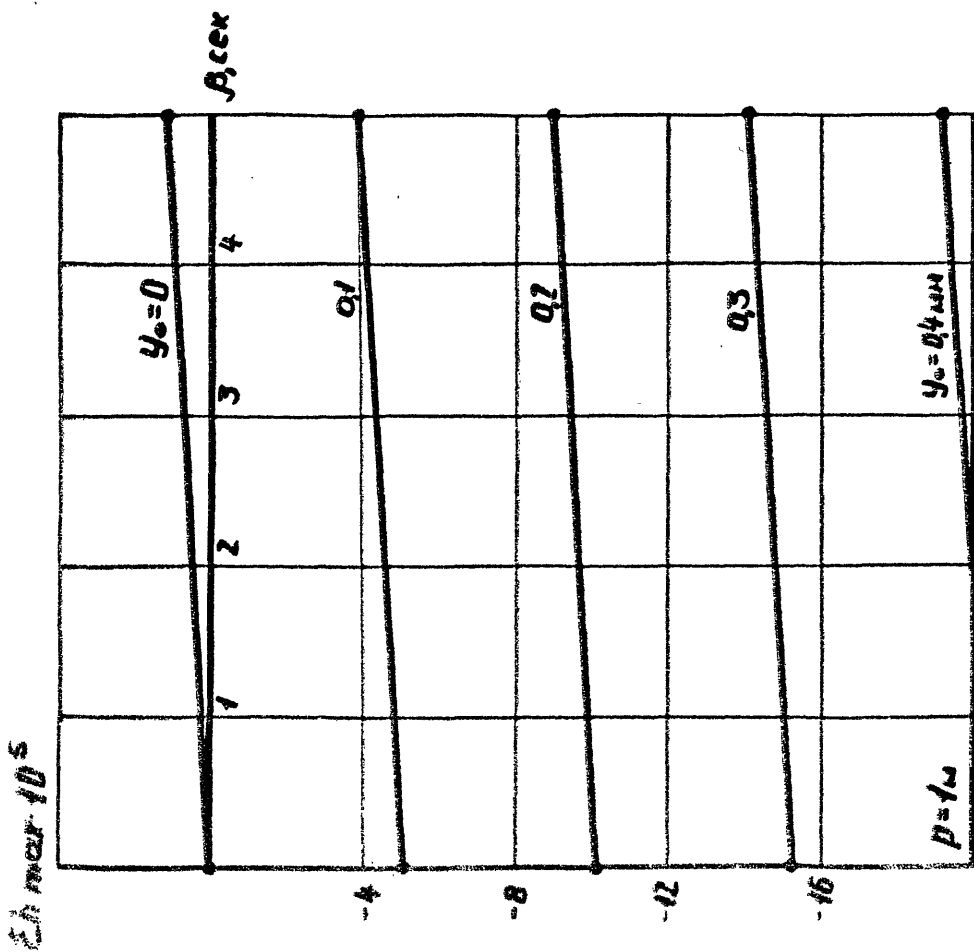


Рис. 3.32. Зависимости $\epsilon_{h \max}$ от β и y_0 при $\rho = 1$ м.

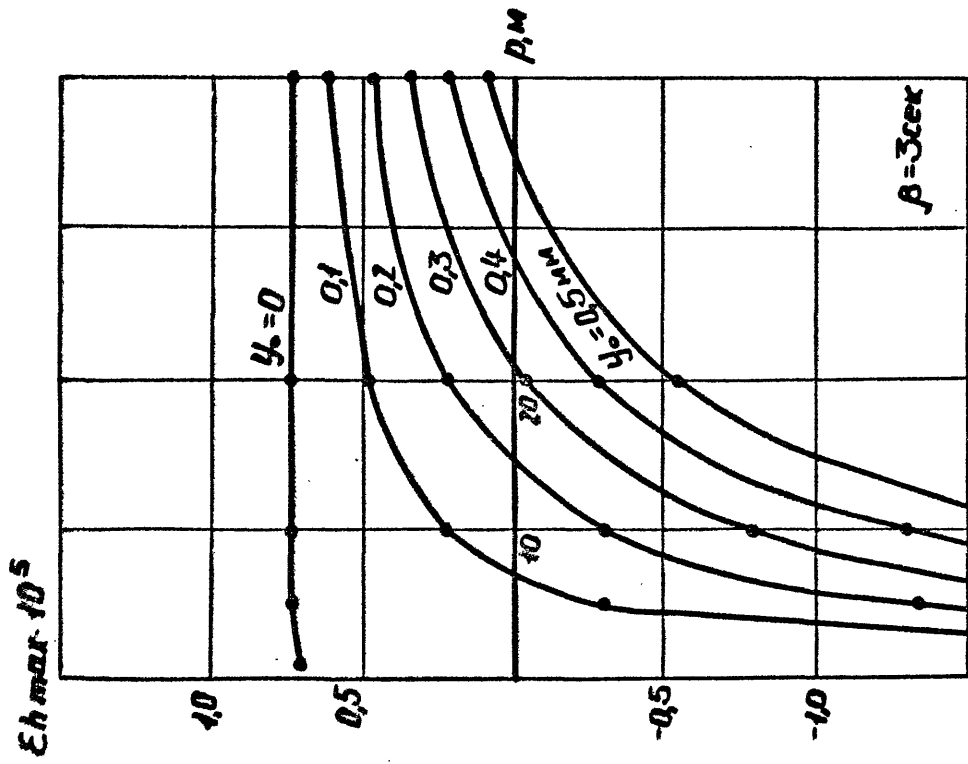


Рис. 3.35. Зависимости Eh_{max} от β и γ_0 при $\beta = 3$ сек.

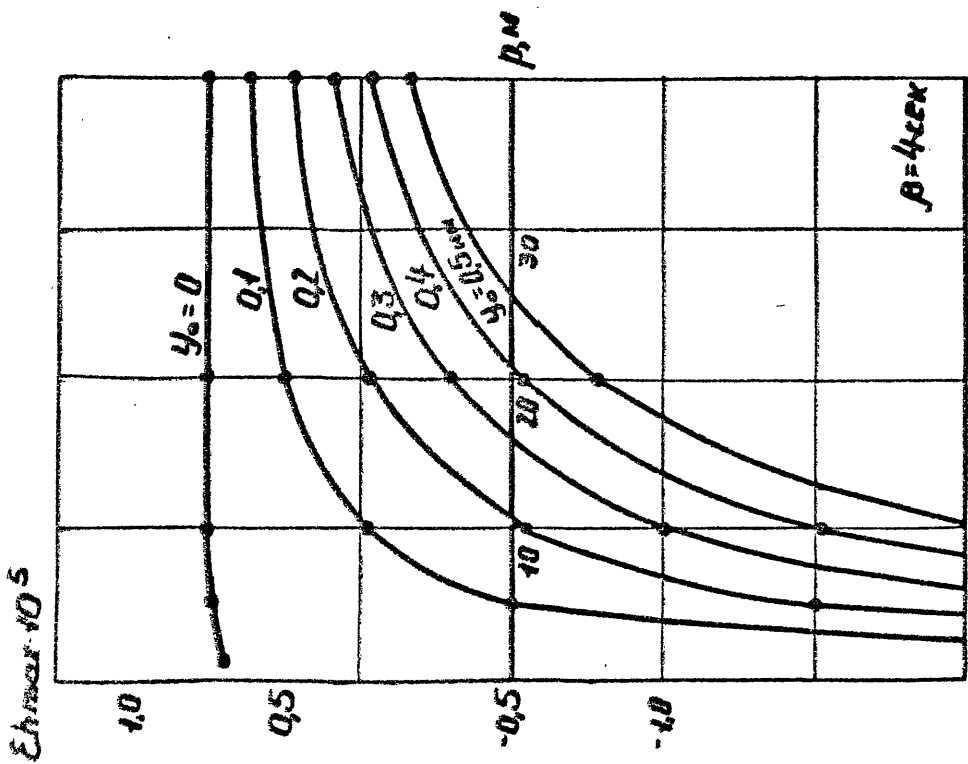


Рис. 3.34. Зависимости Eh_{max} от β и γ_0 при $\beta = 4$ сек.

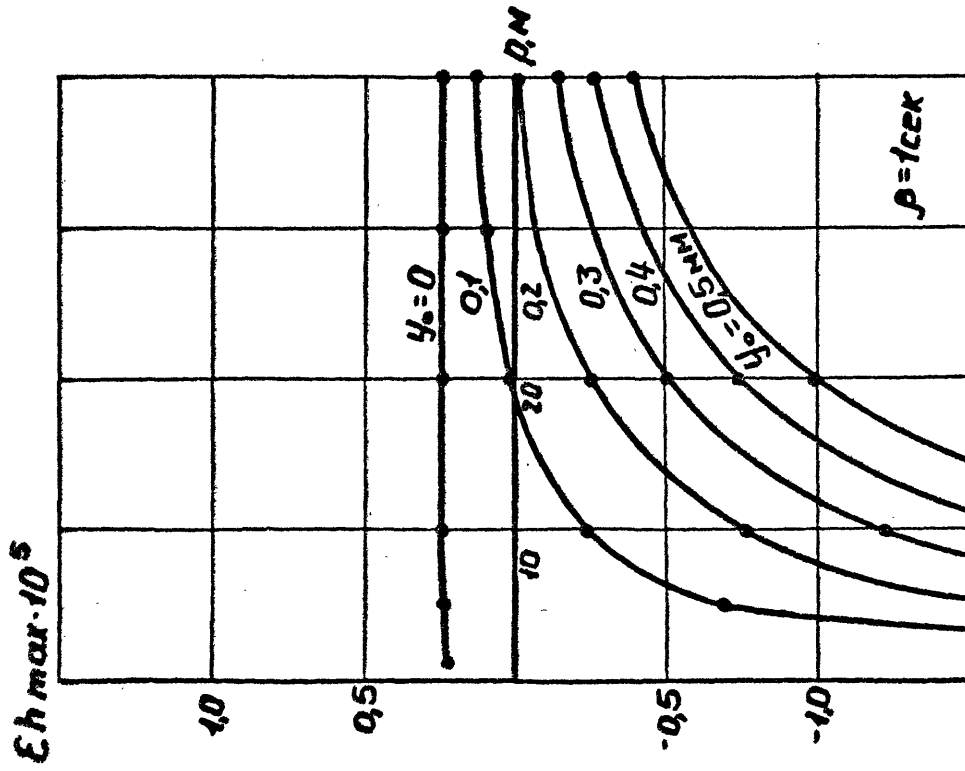


Рис. 3.36. Зависимости Eh_{max} от β и y_0 при $\beta = 2$ сек.

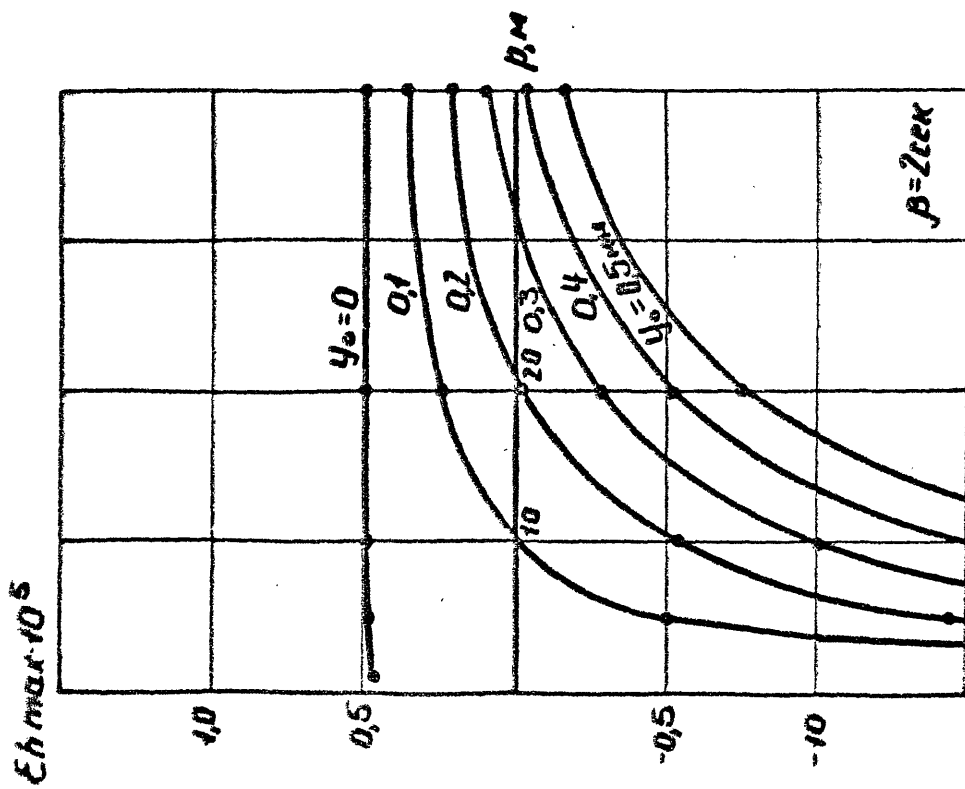


Рис. 3.37. Зависимости Eh_{max} от β и y_0 при $\beta = 1$ сек.

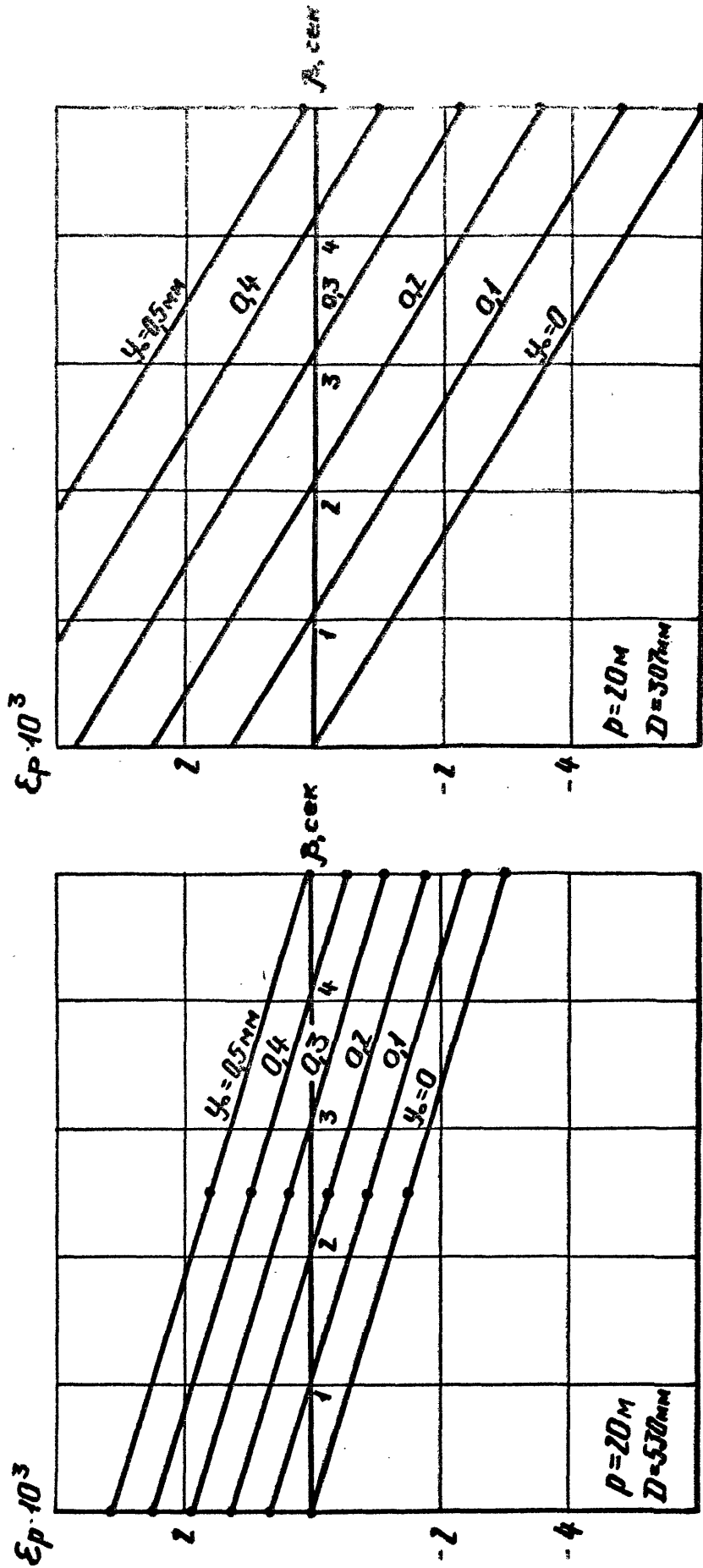


Рис. 3.38. Зависимости ϵ_p от β и γ_0
 при $p = 20$ м, $D = 530$ мм.

Рис. 3.39. Зависимости ϵ_p от β и γ_0
 при $p = 20$ м, $D = 307$ мм.

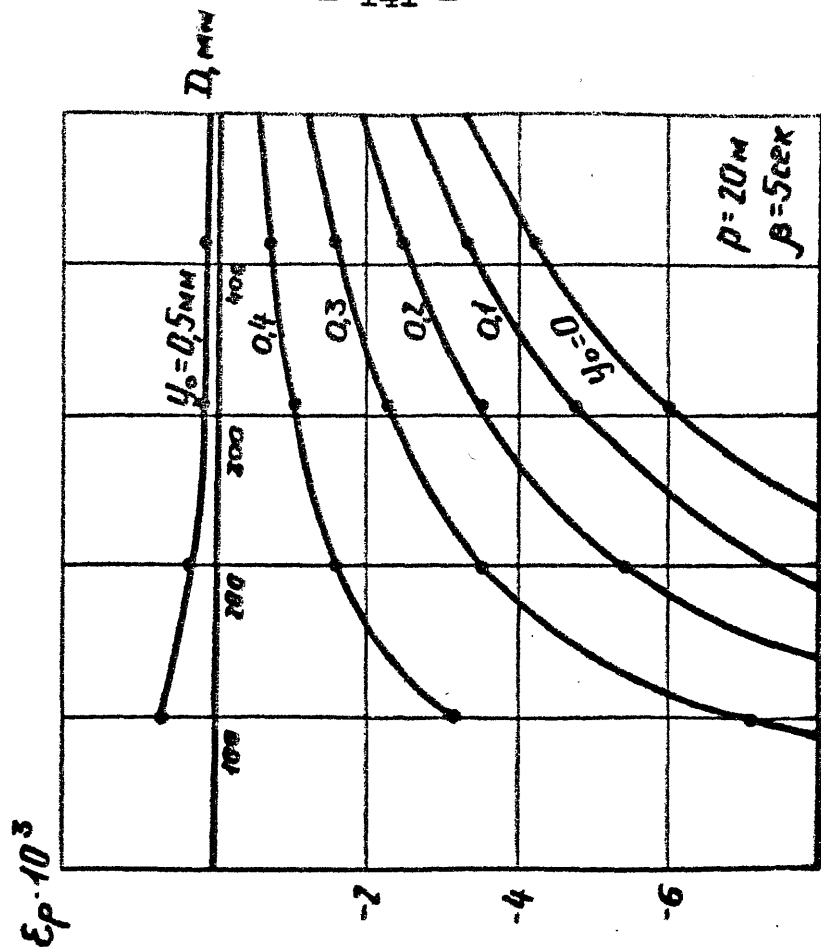


Рис. 3.41. Зависимости ϵ_p от D и y_0 при $p = 20$ м, $\beta = 5$ сек.

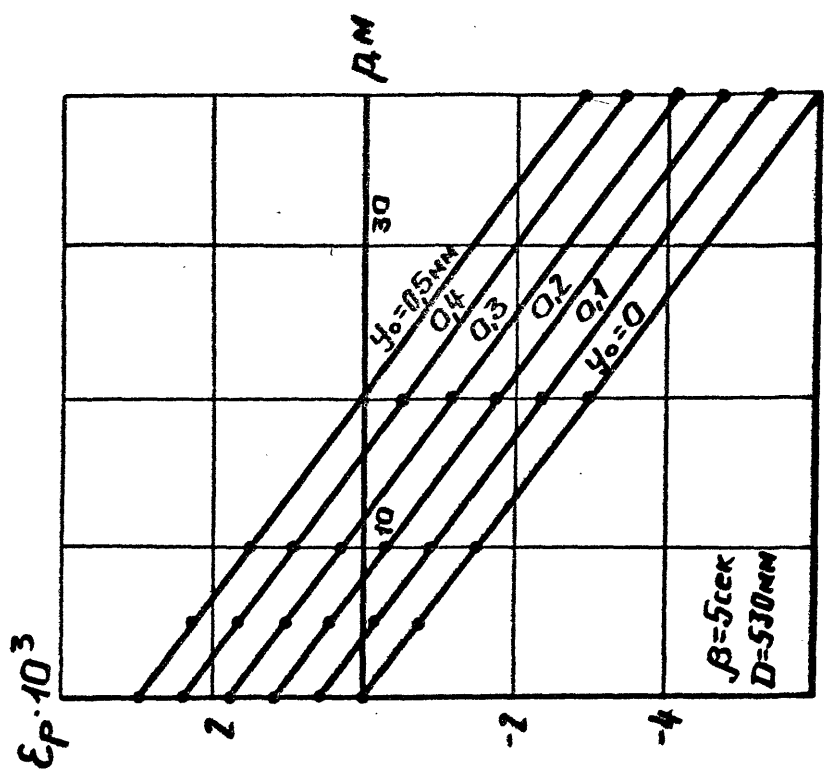


Рис. 3.40. Зависимости ϵ_p от p и y_0 при $\beta = 5$ сек, $D = 530$ мм.

свойство даёт возможность осуществлять настройку станка на обработку чрезвычайно точных поверхностей. Причём предел точности в статике определяется в первую очередь чувствительностью и стабильностью регулировки параметров y_0 и β .

Поскольку в рассмотренных граничных условиях значения параметров y_0 и β незначительно отличаются от нуля можно определить простые выражения для инженерного расчёта значений $\varepsilon_{hmax}(y_0, \beta)$ и $\varepsilon_\beta(y_0, \beta)$, которые приведены в таблице 3.2. Погрешность расчётов по этим формулам в исследованных граничных условиях не превышает: для ε_{hmax} - 5,5%, для ε_β - 10%.

3.3.11. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ R_u , α , α_1 , x_0 , y_0 , β

Если рассматривать систему /3.4/ с учётом влияния всех параметров настройки и взять общепринятые [3] положительные направления смещений и поворотов, то относительная погрешность фокального параметра определится следующим выражением:

$$\varepsilon_\beta = \varepsilon_\beta(R_u, \alpha, \alpha_1) + \varepsilon_\beta(x_0) + \varepsilon_\beta(y_0, \beta) \quad / 3.67 /$$

Причём, при вычислении $\varepsilon_\beta(x_0)$ и $\varepsilon_\beta(y_0, \beta)$ берутся значения $R_u = R_{ug}$, $\alpha = \alpha_g$ и $\alpha_1 = \alpha_{1g}$, то есть учитываются погрешности параметров R_u , α и α_1 .

Основные зависимости, выражающие влияние параметров настройки на точность формы и размера обработанной по-

верхности, которые получены в результате анализа сведены в таблицу 3.2.

Замечательное свойство параметров настройки R_u , α , α_1 , y_0 , β взаимно компенсировать погрешности обработанной поверхности даёт возможность обрабатывать чрезвычайно точные поверхности. Например, если на станке мод. МК 6514 параметр $R_u = 300$ мм и определяется с точностью 10 мкм, параметры α и β устанавливаются с точностью 1 секунда, параметры x_0 и y_0 - с точностью 1 мкм, то при обработке детали диаметром 500 мм со сферической торцовой поверхностью радиусом 2 метра наибольшее отклонение формы составит 0,01 мкм, а отклонение размера около 0,001%.

3.4. ВЫВОДЫ

1. Получено общее уравнение поверхности второго порядка с учётом параметров настройки при обработке поворотным суппортом.
2. При обработке поверхностей второго порядка на станке с поворотным суппортом на точность формы обработанной поверхности оказывают влияние параметры y_0 и β , а на точность размера - все параметры настройки R_u , α , α_1 , x_0 , y_0 , β .
3. Параметры y_0 и β взаимно компенсируют как погрешности формы, так и погрешности размера обработанной поверхности, а параметры α и α_1 компенсируют погрешности размера, вызванные неточностью параметра R_u . Это даёт возможность обрабатывать чрезвычайно точные поверхности - наибольшее отклонение формы 0,01 мкм, отклонение размера 0,001%.
4. Для достижения наивысшей точности формы и размера обработанной поверхности в конструкции станка необходимо предусмотреть возможность регулировки всех параметров настройки и настройку станка производить в следующем порядке:
 - настройка параметров y_0 и β для достижения требуемой точности формы обработанной поверхности,
 - настройка параметра x_0 для обработки без центрального выступа /если это требуется/,
 - настройка параметров R_u , α и α_1 для достижения требуемой точности размера фокального параметра обработанной поверхности.

5. Зависимости, определяющие влияние параметров α_0 , γ_0 , β на точность формы и размера обработанной поверхности справедливы не только при обработке на станке с поворотным суппортом, но и при любых других геометрических способах получения рассмотренных и близких к ним поверхностей /например, при обработке на станке с крестовым суппортом и системой ЧПУ/.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные задачи экспериментальных исследований заключаются в проверке и дополнении результатов теоретического анализа, а также в решении вопросов, связанных с практической реализацией основных результатов диссертационной работы.

4.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Экспериментальный стенд /рис.4.1 - 4.4/ для точения сферических поверхностей поворотным суппортом создан на базе экспериментального высокоточного станка для алмазного точения дисков мод. МК 6511.

Шпиндель изделия расположен в гидростатических опорах. Привод шпинделя изделия осуществляется от электродвигателя, ротор которого расположен в аэростатических опорах, через плоскоремённую передачу на шкив, разгруженный от усилия натяжения ремня с помощью гидростатических опор, и далее через пальцевую резинную муфту.

Шпindel врезного суппорта заменена поворотной скалкой 1, на которую со стороны шпинделя изделия крепится резцедержатель 2, а с противоположной стороны рычаг 3 привода подач. Поворотная скалка расположена в гидростатических опорах 4 и 5.

Привод подач осуществляется гидравлическим цилиндром 6, поршнем которого служит скалка 7 на гидростатических опорах. При подаче давления в полости 18 и 19 происходит соответственно врезание и отскок поворотной

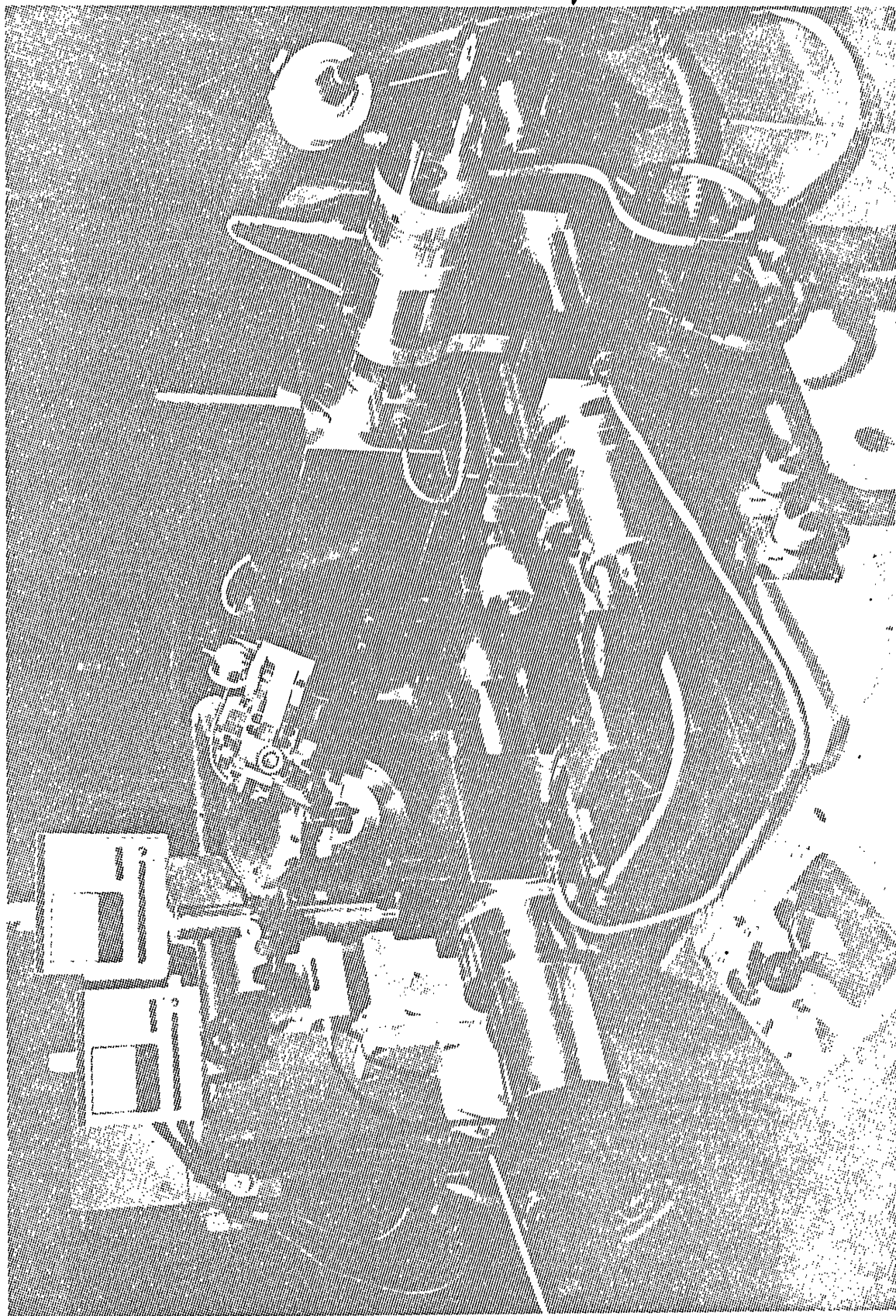
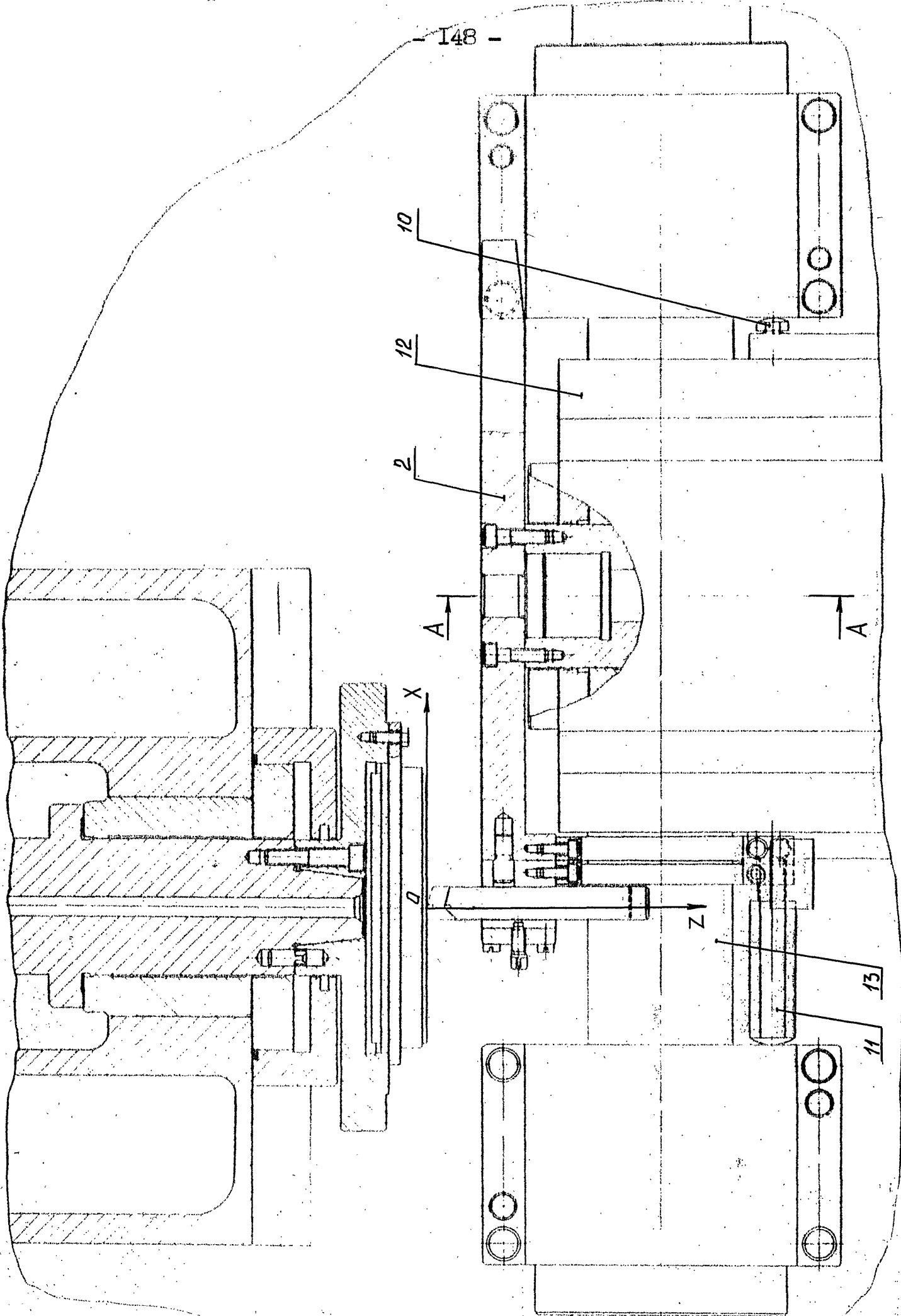


FIG. 4.1. СЪЕМКА НАМЪСНАТО ТЪЧЕЩА СЪБИТИЕТО ОТ ПОСЛЕДНОТО
/НА СЪЩЕ СЪЩЕ ММД, ММ 6511/.



- 148 -

Рис. 4.2. Шпиндельный узел и лоботный суппорт

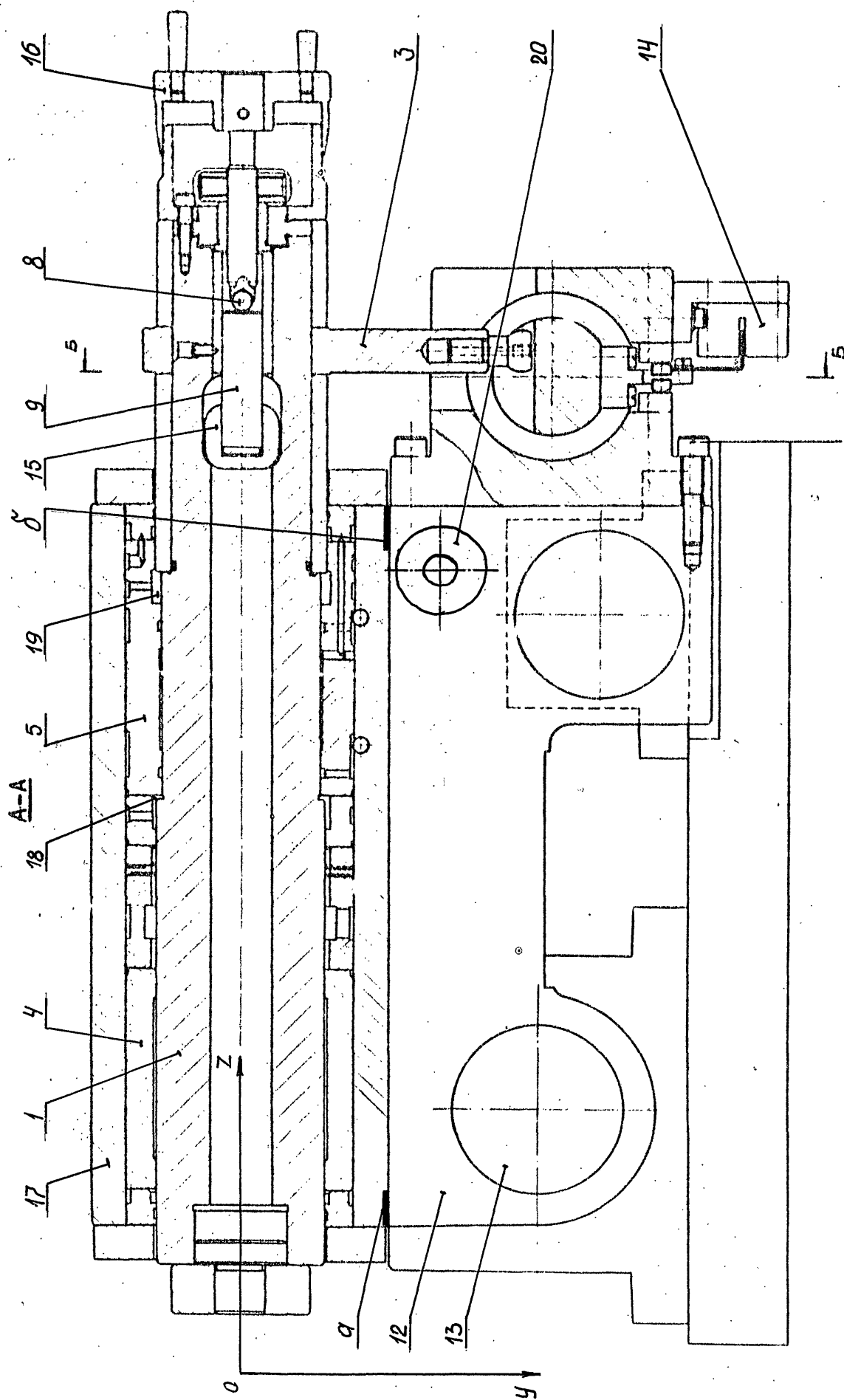


Рис. 4.3. Поворотный суппорт

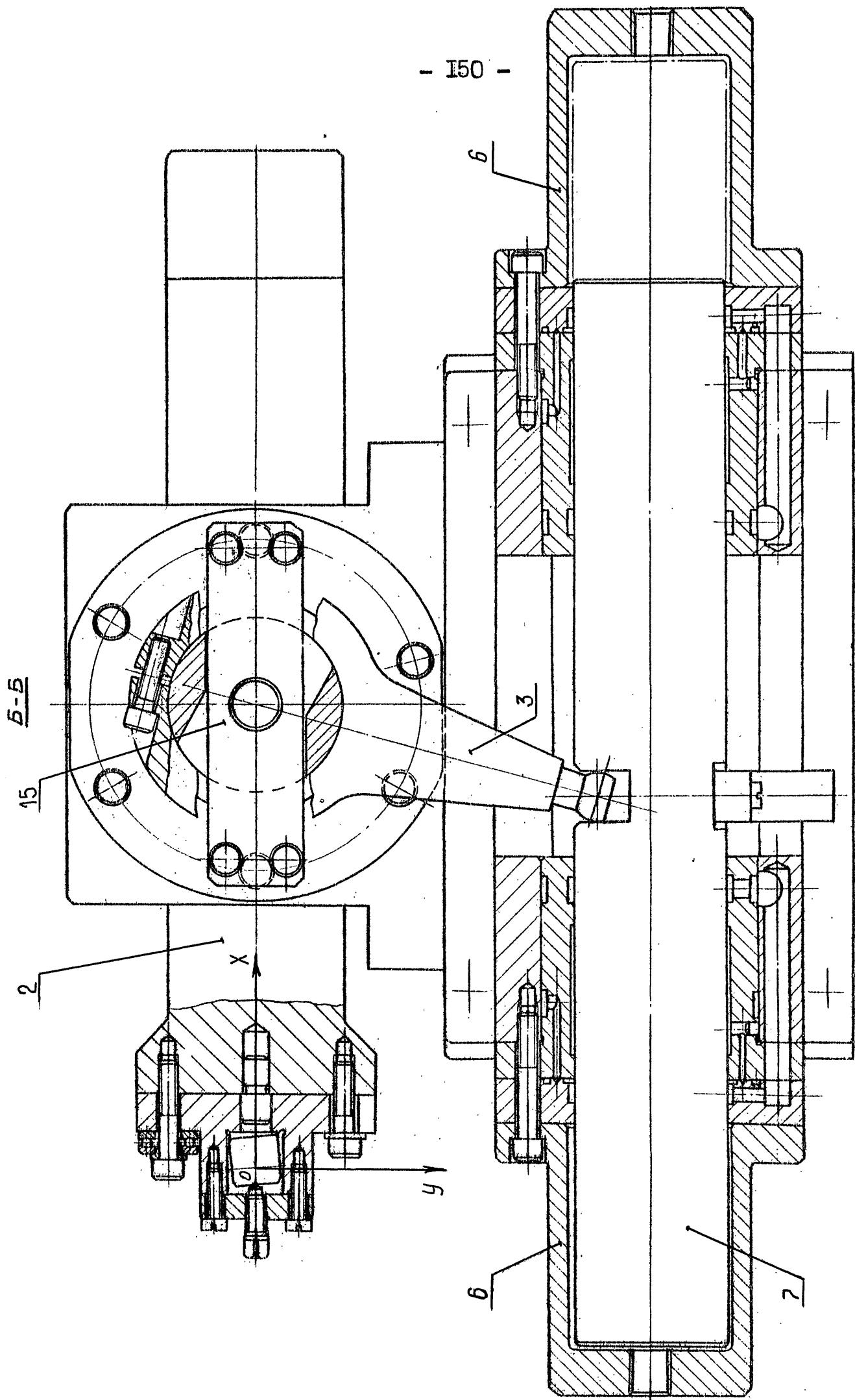


Рис. 4.4. Привод поворотного суппорта

скалки. Величина врезания определяется регулируемым упором 16, закалённый шарик 8 которого при врезании контактирует с плоским неподвижным упором 9.

Угол α , определяющий радиус обработанной сферической поверхности, устанавливается регулировочным винтом 20, который в станке мод. МК 65II служит для установки фасетки инструмента параллельно траектории движения поперечного суппорта.

Точная установка режущей кромки резца таким образом, чтобы её траектория пересекала ось шпинделя /смещение x_0 / осуществляется распорными винтами 10 и 11, смещающими поперечный суппорт 12 по направляющей скалке 13. Контроль перемещения осуществляется индикатором с ценой деления 0,01 мм.

Ограничение хода поворотного суппорта производится с помощью бесконтактных конечных выключателей 14 типа КВД-3.

На резцедержателе предусмотрено устройство для точной установки фасетки резца /если резец с прямолинейной фасеткой/.

Дроссели во всех гидростатических опорах капиллярные - канавка треугольного сечения.

Давление масла в гидросистеме гидростатики 1,0 - 1,2 МПа. Масло "И-5А" ГОСТ 20799-75.

4.2. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Обрабатывались образцы I /рис.4.5/ из меди М0БТУ 48-21-23-77, как правило, с двух сторон - А и Б.

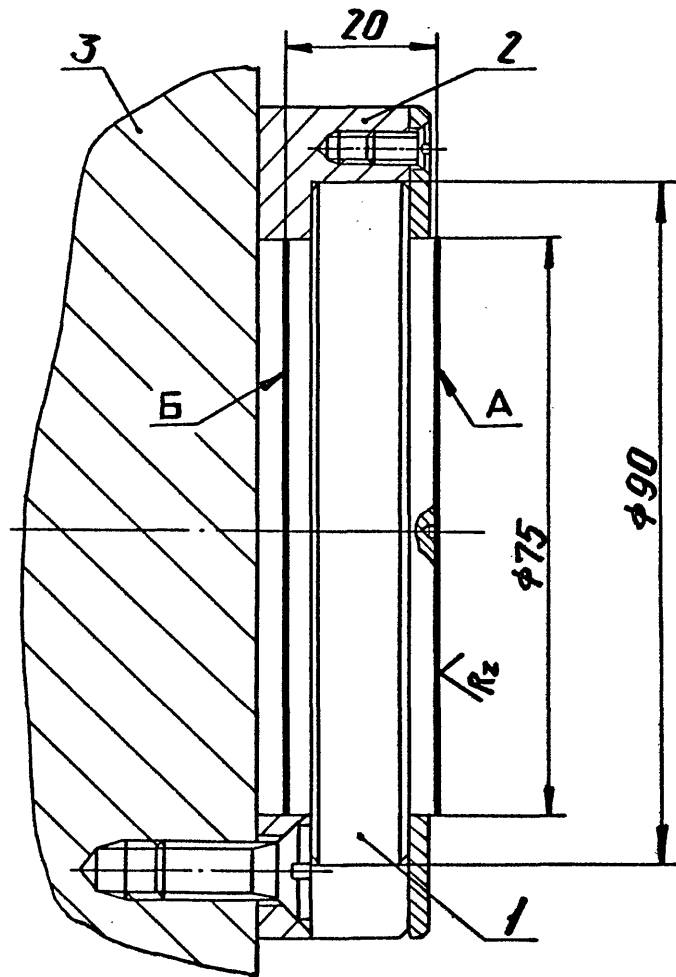


Рис.4.5. Образец и приспособление для его крепления на планшайбе стенда.

Базовые поверхности зажимного приспособления 2, закреплённого на планшайбе 3 и образцов 1 были обработаны на станке особо высокой точности мод. 16Б20А /литер Б/ и имели неплоскостность не более 0,001 мм. Это позволило в сочетании с достаточно высокой жёсткостью образца /соотношение толщины изделия к его диаметру для металлооптики должно быть не менее 1:5/ избежать недопустимо больших деформаций, вызываемых зажимом образца в приспособлении шпинделя.

Для исключения влияния центрального дефекта на точность измерения формы обработанной поверхности образца в центре его выполнена засверловка диаметром 2 мм и глубиной 1 мм.

Проточка производилась резцами из натурального алмаза: с прямолинейной режущей кромкой - типа ИР-227, с радиусной режущей кромкой - типа ИР-292. Параметры резцов указаны в таблице 4.1.

В качестве СОЖ применялся денатурированный спирт, который через специальный распылитель подавался в зону резания в виде тумана.

Точение производилось от периферии образца к центру в верхней половине, то есть выше оси шпинделя.

Перед каждой проточкой контролировался уровень абсолютных колебаний шпиндельной бабки в радиальном и осевом направлениях с помощью прибора /рис.4.1/ для динамической балансировки „Balatron“ тип 2101 фирмы „Kistler Instrument A.G.“ /Швейцария/. Уровень абсолютных осевых колебаний установлен не более 0,1 мкм, радиальных - не более

Таблица 4.1

Геометрические параметры алмазных резцов

| Резец № | Тип резца | Ширина фасетки, мм | Радиус закруг- ления, мм | γ° | α° | φ° | ψ° |
|------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|
| I52I | ИР-227 | 0,39 | - | -2 | - | 15 | 15 |
| I9273 | ИР-227 | 0,6 | - | -2 | - | 15 | 15 |
| I88 | ИР-292 | - | 9 | 0 | 15 | 5 | 4 |
| I82 | ИР-292 | - | 12 | -3 | 15 | 16 | 13 |
| I53 | ИР-292 | 1,6 | 5 | 0 | 11 | 15 | 14 |
| I4 | ИР-292 | - | 1,5 | 0 | - | - | - |

Таблица 4.2

Условия обработки образцов

| Образец № | Резец № | $R_{сф.т.}$ м | $n_{шп.}$ об/мин | S_o мм/об | $t_{рез.}$ мм | γ_o мм | β сек |
|------------------|------------|------------------|---------------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| 1А | I52I | 5 | 1650 | 4,4 | 15 | +0,03 | +39,6 |
| 2А | | | | | | -0,149 | +96,1 |
| 3А | | | | | | +0,13 | +39,6 |
| 4А | | | | | | -0,07 | +39,6 |
| 5А, Б | I9273 | 20 | 1920 | 7 | 5 | +0,208 | -73,4 |
| 6Б | | | | | | +0,228 | -129,9 |
| 7А, Б | | | | | | +0,189 | -16,9 |
| 8А, Б | | | | | | +0,188 | +209,1 |
| 9А, Б | | | | | | +0,068 | +152,6 |
| 10А, Б 11А, Б | I52I | | 2160 | 6 | | +0,185 | -5,6 |

0,2 мм. Если при проверке значения амплитуд были больше указанных, то производилась подбалансировка с помощью передвижных грузиков на планшайбе шпинделя.

Все проточки производились на предварительно разогретом станке с контролем температуры в трёх точках:

$t_1 = 23^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ - температура окружающей среды около шпиндельной бабки на расстоянии 0,5 м на уровне оси шпинделя;

$t_2 = 33^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ - температура фланца передней опоры шпинделя;

$t_3 = 28^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ - температура масла в гидростанции гидростатики.

Изменение величины параметров γ_0 и β производилось смещением корпуса поворотного суппорта в вертикальной плоскости с помощью подкладок в точках "а" и "б"

/рис. 4.3/.

Первоначально индикатором с ценой деления 0,01 мм на магнитной стойке был произведён замер величины

$\gamma_{\text{нач}} = 0,13$ мм. Затем суппорт был установлен в положение соответствующее $\alpha = 0$ по пробной проточке с точностью 1 мкм на диаметре 70 мм.

Далее, в соответствии с заданной величиной радиуса обработанной сферической поверхности по формуле /рис. 4.6/:

$$c = d \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где: $\alpha = \arcsin \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{сф}}}$

была рассчитана величина c и установлен требуемый угол α .

Параметры γ_0 и β изменялись в следующих пределах:

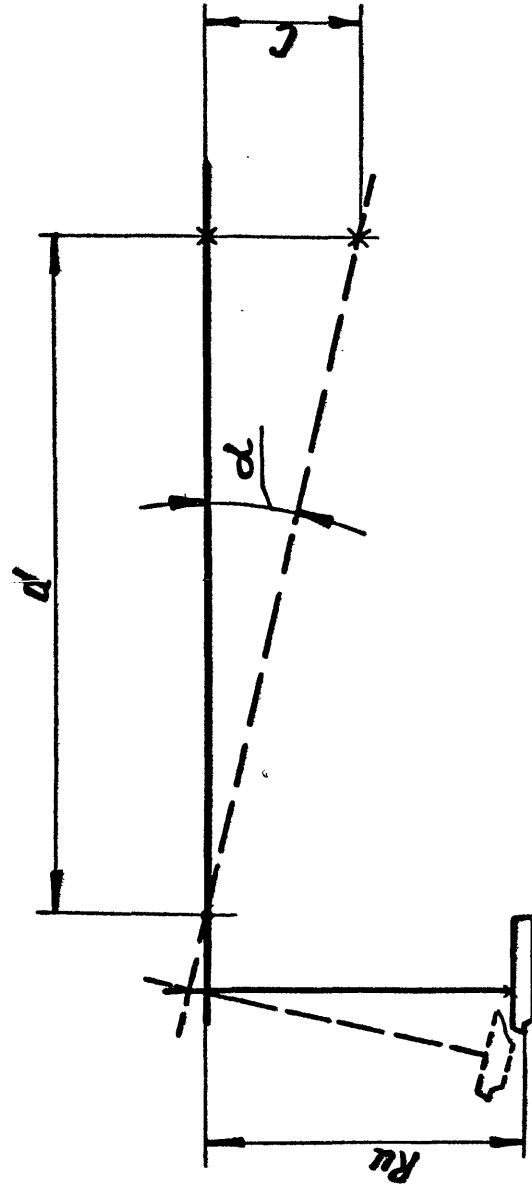


Рис. 4.6. Схема расчёта смещения оси поворотного существа на угол α .

$$y_0 = + 0,13 \dots - 0,07 \text{ мм.}$$
$$\beta = - 130 \dots + 209 \text{ сек.}$$

Условия обработки каждого образца приведены в таблице 4.2.

Точность формы и размера обработанных поверхностей контролировались на специальном стенде теневых измерений, созданном на базе теневого прибора ИАБ-45I у заказчика.

Сущность теневого метода заключается в следующем. Длиннофокусные объективы: коллиматор 4 и наблюдательная труба 6 /рис.4.7/ создают в плоскости 8 изображение ярко освещенной щели 3. В этой же плоскости установлена диафрагма 7 с прямолинейным острым краем /нож Фуко/, которая при перекрывании изображения щели вызывает равномерное ослабление яркости экрана 9 по всему полю.

Если в поле параллельного хода лучей ввести оптическую неоднородность /участок с изменяющимся показателем преломления/ отклонение лучей в ней вызовет перераспределение освещенности экрана 9. В этом случае на экране не будет наблюдаться теневая картина неоднородности 5.

Угол отклонения луча ε в данной точке неоднородности измеряется как отношение величины Δ линейного перемещения ножа до момента перекрывания определённого луча к величине f' заднего фокусного расстояния объектива 6:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{f'} \text{ (радиан).}$$

Оптическая система прибора и его конструкция позволяют изучать распределение плотностей, вызывающих отклонение луча на углы величиной 24 мин.

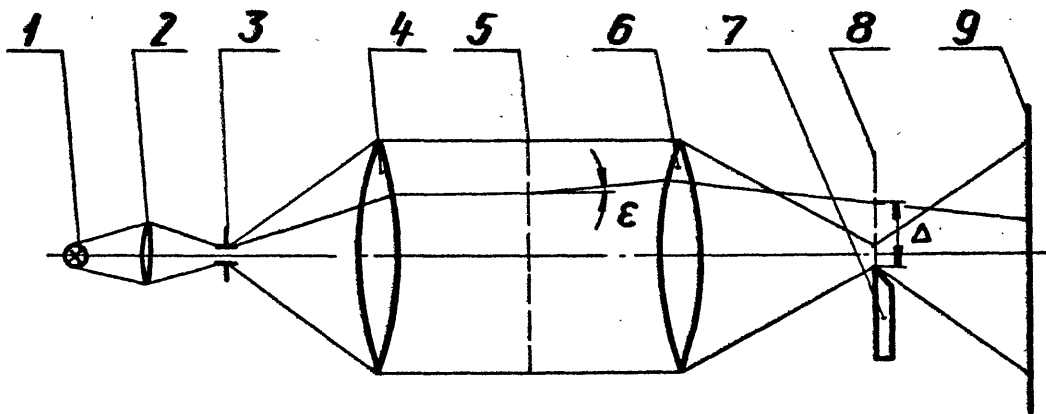


Рис.4.7. Принципиальная оптическая схема
теневого прибора ИАБ-45I.

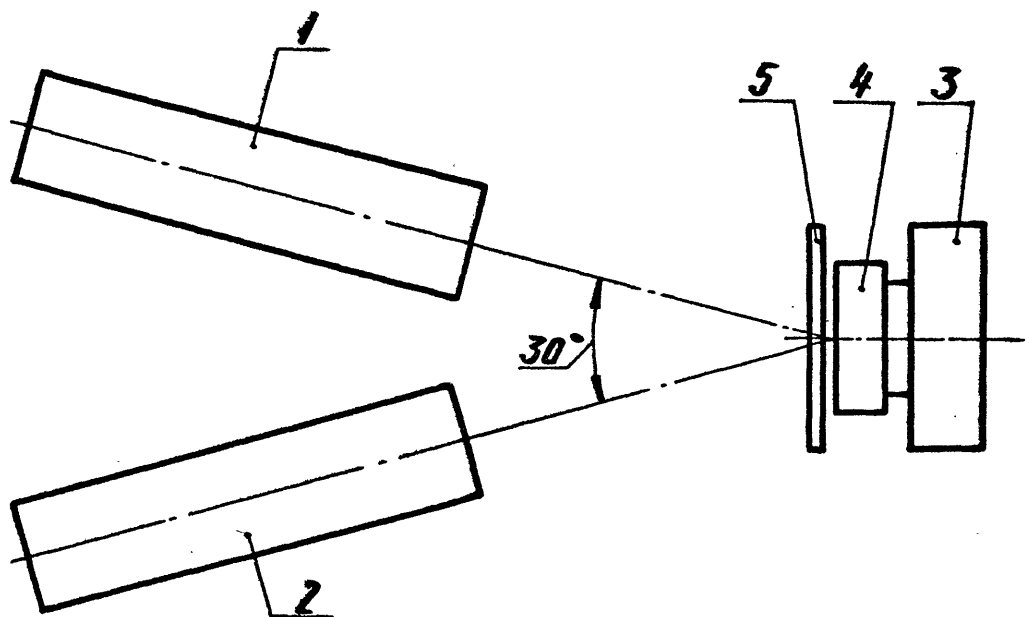


Рис.4.8. Схема измерения формы и размера сферической
поверхности прибором ИАБ-45I.

Оптическая схема теневого прибора ИАБ-451 была преобразована /рис.4.8/ для измерения формы и размера сферических поверхностей большого радиуса. Теперь, если в поле параллельного хода лучей ввести контролируемое изделие, имеющее отклонение от идеальной плоскости, то отклонение лучей на ней вызовет перераспределение освещенности экрана 9. В этом случае на экране будет наблюдаться теневая картина отклонения поверхности 5 от плоскости. С помощью стандартных регистрирующих устройств наблюдательной трубы измеряются отклонения профиля в каком-либо сечении исследуемого сечения изделия. Затем, по двум крайним и центральным точкам определяют радиус ближайшей идеальной сферической поверхности и рассчитывают значения отклонений формы исследуемого изделия от этой ближайшей идеальной сферической поверхности.

Погрешность измерения радиуса ближайшей идеальной сферической поверхности не превышает 0,5%.

Шероховатость обработанной поверхности определялась по профилограммам, записанным на профилографе-профилометре П-201

4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.3.1. ПАРАМЕТР y_0

Обработка результатов эксперимента, которые представлены в таблице 4.3 и на рис.4.9, 4.10 показала следующее:

1. Наибольшее отклонение $h_{max\text{ ср}}$ формы при изменении параметра y_0 от +0,13 мм до -0,07 мм составило 1,85...1,45 мкм.

Таблица 4.3

Отклонение профиля обработанной
поверхности от сферы

| r , мм | h , мкм | | | |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|
| | Образец № | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | Сторона | | | |
| | A | A | A | A |
| -35 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -30 | +0,80 | +1,87 | +1,00 | +0,92 |
| -25 | +1,30 | +3,00 | +1,42 | +1,52 |
| -20 | +1,45 | +3,45 | +1,52 | +1,80 |
| -15 | +1,62 | +3,30 | +1,37 | +1,71 |
| -10 | +1,45 | +2,40 | +1,00 | +1,27 |
| -5 | +0,55 | +0,85 | +0,30 | +0,47 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| +5 | +0,40 | +0,90 | +0,45 | +0,50 |
| +10 | +1,03 | +2,30 | +1,03 | +1,21 |
| +15 | +1,40 | +3,22 | +1,25 | +1,69 |
| +20 | +1,37 | +3,65 | +1,37 | +1,90 |
| +25 | +1,05 | +3,35 | +1,07 | +1,71 |
| +30 | +0,37 | +2,10 | +0,72 | +1,11 |
| +35 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $R_{c\phi}$, мм | - | - | - | - |

h, MKM

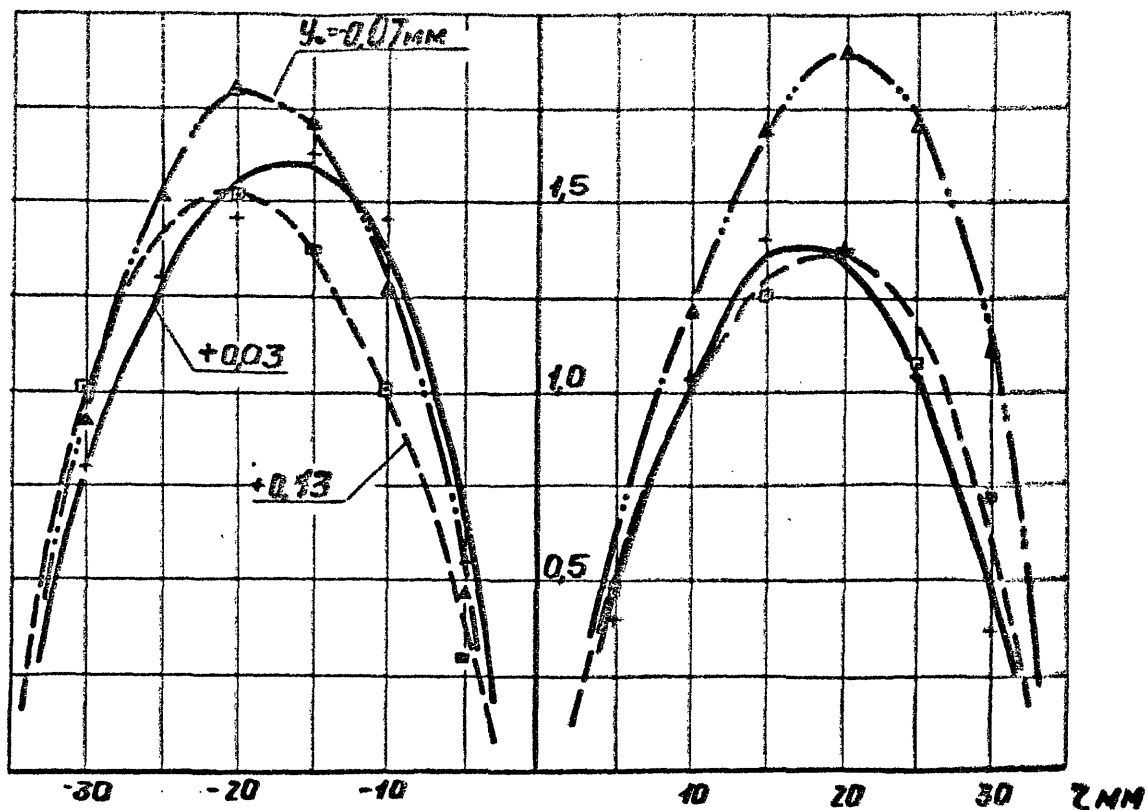


Рис. 4.9. Экспериментальные графики отклонений профиля обработанной поверхности от сферы при изменении y_0 .

$h_{\text{max ср.}}$
 MKM

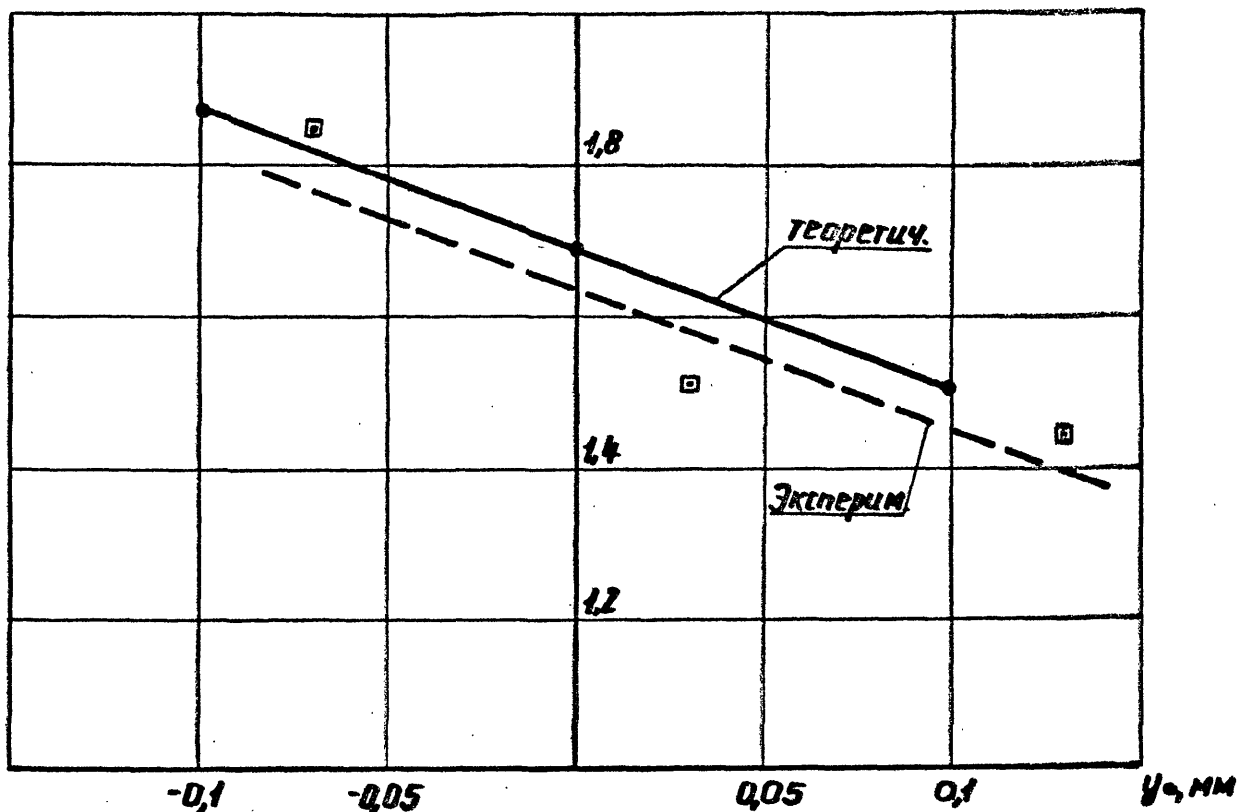


Рис. 4.10. Экспериментальная и теоретическая зависимости $h_{\text{max ср}}$ от y_0 .

2. Теоретическая зависимость на рис.4.10 несколько выше экспериментальной из-за неточности определения истинного значения угла β .
3. При учёте неточности определения угла β /см. пунктирную линию/ отклонение экспериментальной зависимости от теоретической не превышает 10%.
4. Неодинаковость величин h_{max} /рис.4.9/ у правой и левой ветвей графиков отклонений формы для всех образцов вызвана видимо наличием незначительных /порядка 0,1...0,22 мкм/ деформаций самого образца. Возможные причины деформаций: несовершенство методов зажима образца на станке для обработки и на теневой установке для измерений, внутренние напряжения в образце, неодинаковость температурных условий при обработке и измерении, неудовлетворительные условия транспортировки и т.п.

4.3.2. ПАРАМЕТР β

Обработка результатов эксперимента, которые представлены в таблицах 4.3 - 4.5 и на рис.4.11 - 4.13 показала следующее:

1. Наибольшее отклонение $h_{max\text{ ср}}$ формы при изменении параметра β от -129,9 сек до +152,6 сек составило от -4,25 до +5,63 мкм.
2. Экспериментальная зависимость на рис.4.12 имеет наименьшие отклонения от теоретической при малых значениях β , а с увеличением значения β расхождение увеличивается, но не превышает 10% в исследованном

Таблица 4.4

Отклонение профиля обработанной
поверхности от сферы

| z, мм | h, мкм | | | | |
|----------|-----------|--------|---------|--------|--------|
| | Образец № | | | | |
| | 5 | | 6 | | 7 |
| | Сторона | | | | |
| | А | Б | А | А | Б |
| -35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -30 | -1,73 | -1,56 | -2,44 | -0,06 | -0,06 |
| -25 | -1,82 | -2,54 | -4,13 | -0,21 | -0,21 |
| -20 | -1,84 | -2,80 | -4,93 | -0,30 | -0,33 |
| -15 | -1,63 | -2,47 | -4,93 | -0,34 | -0,42 |
| -10 | -1,43 | -1,55 | -4,11 | -0,29 | -0,41 |
| -5 | -0,85 | -0,23 | -2,47 | -0,13 | -0,24 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| +5 | +0,21 | -1,11 | +0,17 | -0,05 | +0,12 |
| +10 | -1,31 | -2,02 | -1,95 | -0,09 | +0,09 |
| +15 | -1,95 | -2,52 | -3,15 | -0,03 | +0,11 |
| +20 | -2,20 | -2,62 | -3,57 | +0,04 | +0,12 |
| +25 | -1,90 | -2,24 | -3,19 | +0,16 | +0,16 |
| +30 | -1,13 | -1,32 | -1,99 | +0,21 | +0,20 |
| +35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rсф, мм | -50463 | -55467 | -401892 | -26309 | -24834 |

Таблица 4.5

Отклонение профиля обработанной
поверхности от сферы

| r , мм | h , мкм | | | |
|---------------|-----------|-------|--------|--------|
| | Образец № | | | |
| | 8 | | 9 | |
| | Сторона | | | |
| | А | Б | А | Б |
| -35 | - | - | 0 | 0 |
| -30 | 0 | 0 | +4,21 | +2,36 |
| -25 | +3,69 | +4,00 | +6,86 | +3,58 |
| -20 | +5,60 | +6,12 | +8,04 | +3,77 |
| -15 | +5,90 | +6,36 | +7,86 | +3,02 |
| -10 | +4,52 | +4,99 | +6,35 | +1,55 |
| - 5 | +1,79 | +2,10 | +3,56 | +0,155 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| + 5 | +1,50 | +1,32 | -0,25 | +1,46 |
| +10 | +4,30 | +3,97 | +2,60 | +3,55 |
| +15 | +5,80 | +5,35 | +4,50 | +5,00 |
| +20 | +5,60 | +5,66 | +5,21 | +5,50 |
| +25 | +3,70 | +3,72 | +4,74 | +4,90 |
| +30 | 0 | 0 | +3,06 | +3,90 |
| +35 | - | - | 0 | 0 |
| $R_{сф}$, мм | -3950 | -8864 | -10836 | -12323 |

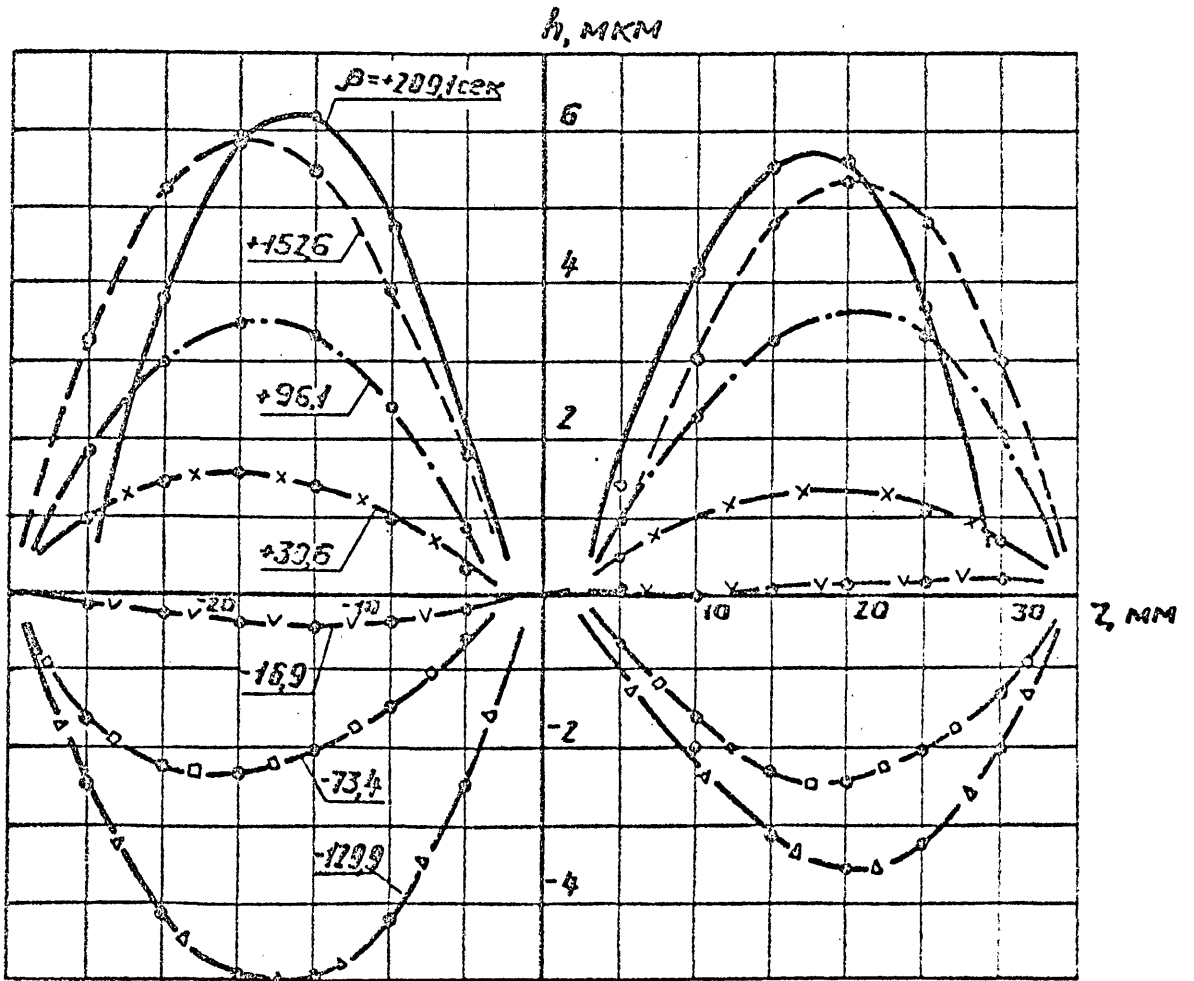


Рис.4.II. Экспериментальные графики отклонений профиля обработанной поверхности от сферы при изменении β .

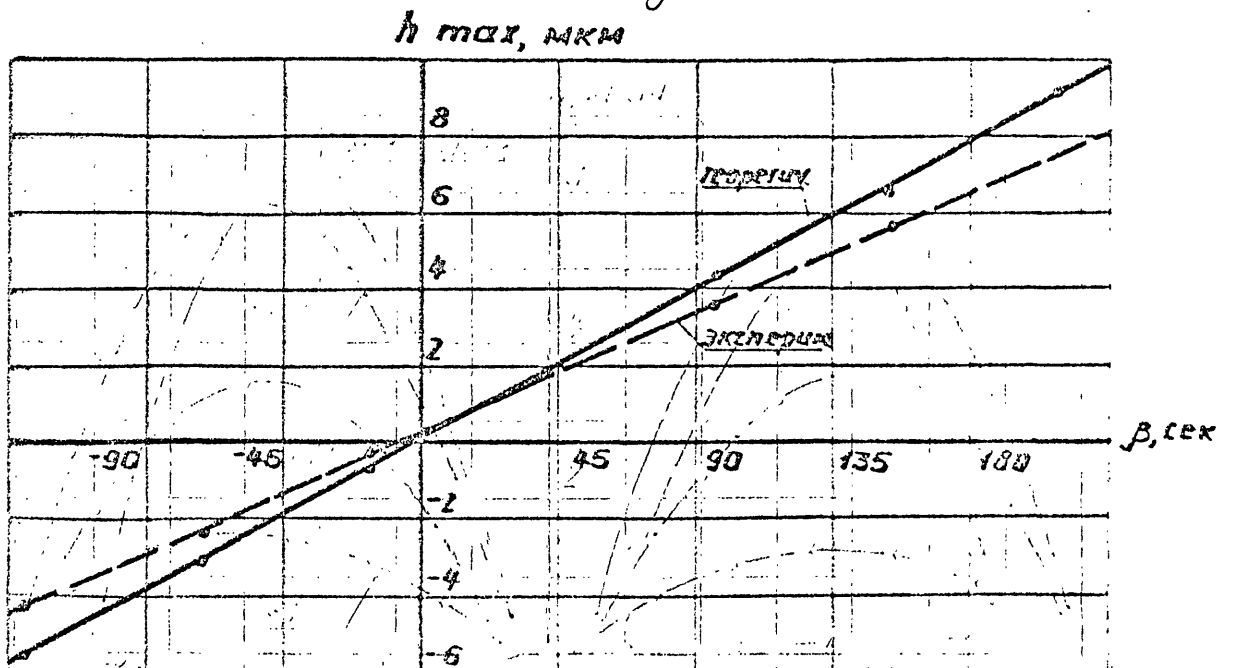


Рис.4.I2. Экспериментальная и теоретическая зависимости h_{max} от β .

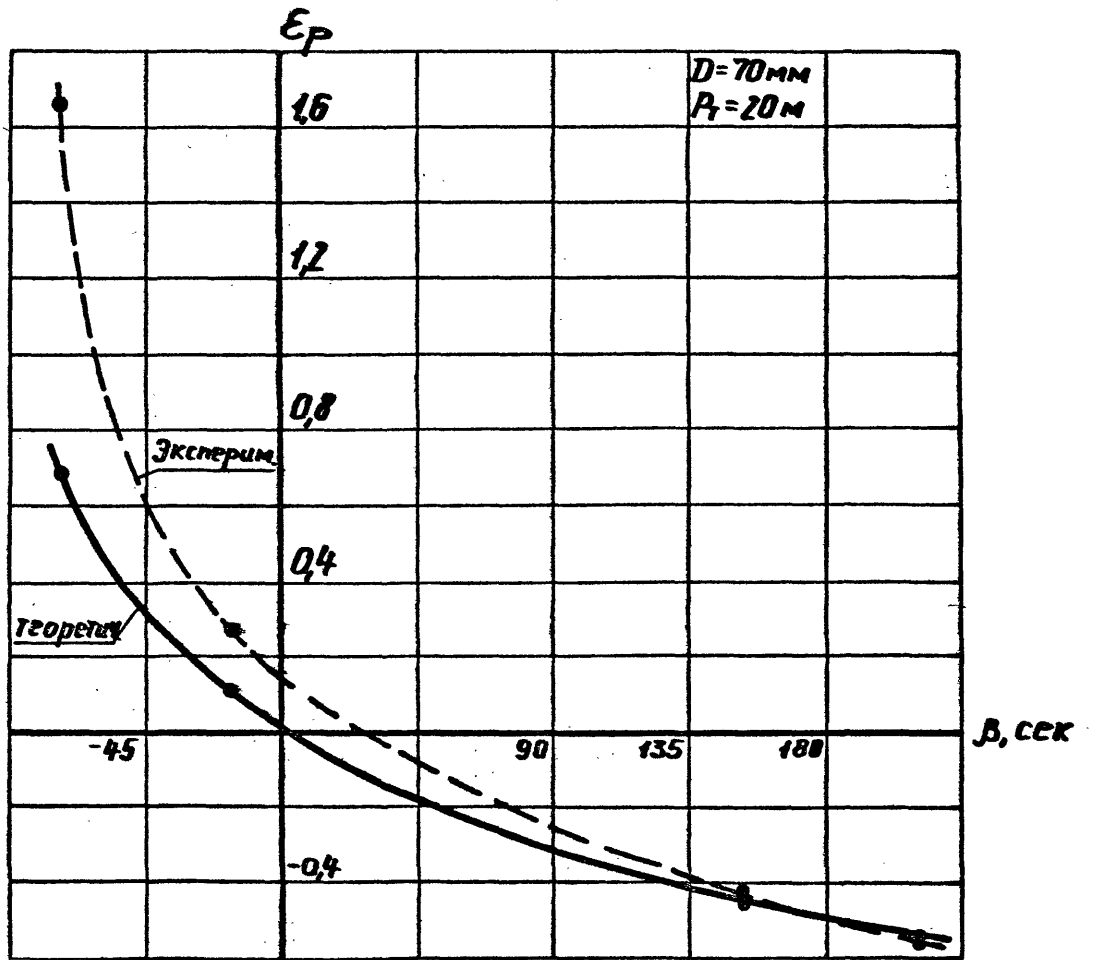


Рис.4.13. Экспериментальная и теоретическая зависимости ϵ_p от β .

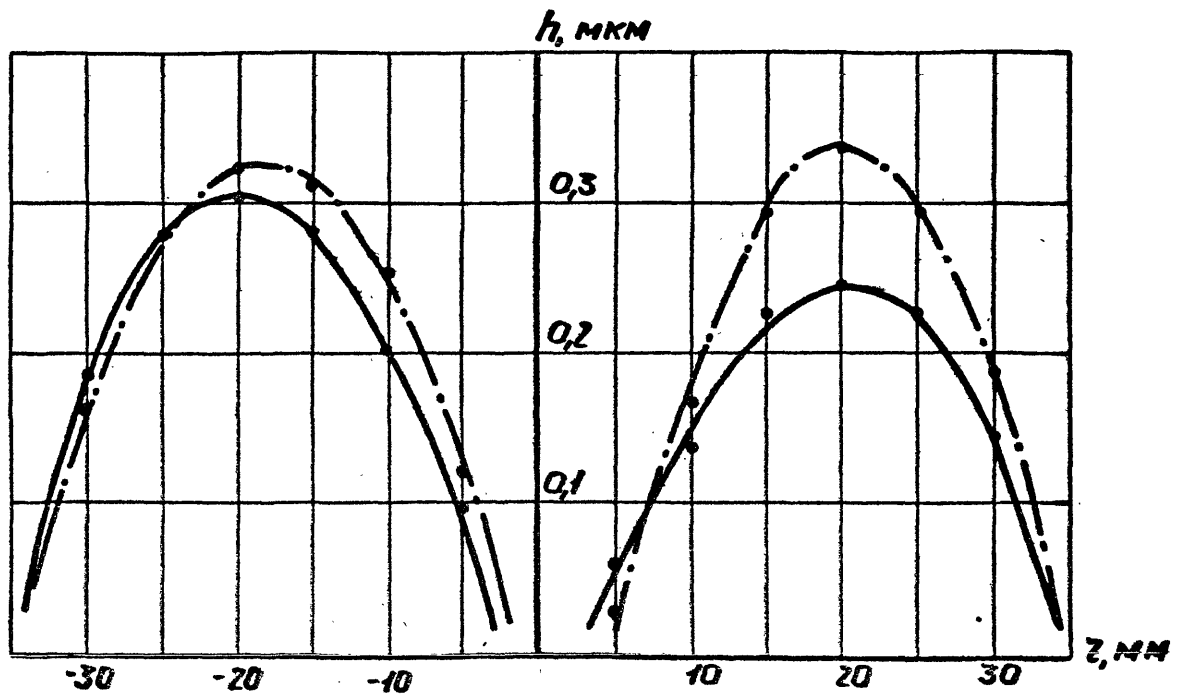


Рис.4.14. Погрешность формы после уточнения настройки.

интервале значений параметра β . Это вызвано тем, что с увеличением значения β погрешность в определении начальных условий для расчёта h_{max} вносит большие искажения в получаемый результат, а также тем, что видимо при изменении угла β одновременно происходило изменение величины параметра y_0 , который несколько уменьшал /компенсировал/ расчётную величину h_{max} .

3. Неодинаковость величины h_{max} /рис.4.11/ у правой и левой ветвей графиков имеет те же причины, что и у графиков h_{max} на рис.4.9.
4. Наибольшая относительная погрешность ϵ_r радиуса сферической поверхности при изменении параметра β от $-73,4$ сек до $+209,1$ сек составила около $1,65$.
5. Экспериментальная зависимость на рис.4.13 имеет наименьшее отклонение от теоретической при положительных значениях β , а с увеличением отрицательных значений β имеет наибольшие отклонения не превышающие 15% . Это вызвано тем, что при увеличении отрицательных значений β радиус реально обработанной сферической поверхности увеличивается и достигает расчётного значения 33871 мм.

В этом случае имеем:

- расчётная стрелка $18,0834$ мкм
- реальная стрелка $11,5643$ мкм
- разность $6,5191$ мкм.

Удельный вес погрешностей параметров α , β , R_v , y_0 и деформации при этом увеличиваются.

После анализа полученных результатов в первой серии проточек с изменением параметра β была проведена коррекция значения параметра β на величину 11,3 сек. образцы подвергнуты термической обработке /отжигу/ для снятия внутренних напряжений. Было проточено два образца /четыре поверхности/.

Обработка результатов эксперимента, которые представлены в таблице 4.6 и на рис.4.14 показала следующее:

1. Наибольшее отклонение $h_{max, ср}$ составило - $0,30625 \pm 0,084$ мкм.
2. Среднее значение радиуса сферической поверхности $R_{сф}$ составило - $29727,5 \pm 490,5$ мм. Наибольшее отклонение 1,7%.
3. Разброс значений h_{max} и $R_{сф}$ объясняется в основном погрешностями, вносимыми шероховатостью обработанной поверхности /среднее значение $R_z = 0,0815 \pm 0,024$ мкм/ и деформациями образца, которые составили от 0,0195 мкм до 0,049 мкм.

Таблица 4.6

Отклонение профиля обработанной
поверхности от сферы

| z , мм | h , мкм | | | |
|---------------|-----------|--------|--------|--------|
| | Образец № | | | |
| | IО | | II | |
| | Сторона | | | |
| | А | Б | А | Б |
| -35 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -30 | +0,248 | +0,125 | +0,178 | +0,150 |
| -25 | +0,332 | +0,228 | +0,325 | +0,235 |
| -20 | +0,354 | +0,261 | +0,356 | +0,292 |
| -15 | +0,315 | +0,254 | +0,343 | +0,282 |
| -10 | +0,208 | +0,200 | +0,292 | +0,219 |
| - 5 | +0,066 | +0,131 | +0,165 | +0,080 |
| 0 | - | - | - | - |
| + 5 | +0,087 | +0,038 | +0,018 | +0,040 |
| +10 | +0,210 | +0,068 | +0,168 | +0,170 |
| +15 | +0,286 | +0,168 | +0,260 | +0,330 |
| +20 | +0,274 | +0,222 | +0,289 | +0,390 |
| +25 | +0,240 | +0,215 | +0,260 | +0,330 |
| +30 | +0,158 | +0,138 | +0,200 | +0,180 |
| +35 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $R_{сф}$, мм | -29411 | -30016 | -30232 | -29251 |

4.4. ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследовано влияние параметров настройки сферотокарного станка на точность формы и размера обработанной поверхности.
2. Получены экспериментальные графики зависимостей наибольших отклонений h_{max} от параметров настройки u_0 и β . Отклонение экспериментальных данных от теоретических не превышает 10%.
3. Получен экспериментальный график зависимости относительной погрешности ε_r радиуса сферической поверхности от параметра настройки β . Отклонение экспериментальных данных от теоретических не превышает 15%.
4. Отклонение экспериментальных данных от теоретических объясняется неточностью определения истинного значения параметров настройки, а также деформациями самого образца и шероховатостью обработанной поверхности.
5. После соответствующей настройки параметров станка наибольшее отклонение формы образца диаметром 70 мм от ближайшей сферической поверхности составило 0,306 мкм, а наибольшее отклонение радиуса обработанной сферической поверхности от расчетного составило 1,7%.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлен комплекс факторов, оказывающих влияние на точность формы и размера обработанной особо точной поверхности.
2. Экспериментально показано, что при алмазном точении меди, алюминия, алюминиевых сплавов Д16Мп, О1541 и т.п. :
 - возможна обработка с шероховатостью менее 0,01 мкм,
 - получение указанной шероховатости обработанной поверхности практически не зависит от изменения скорости резания в диапазоне 1730...0,005 м/мин.
3. Применительно к алмазному точению особо точных поверхностей получены выражения, определяющие взаимосвязь вынужденных относительных колебаний с параметрами точности обработанной поверхности.
4. На основе исследований показано, что в станках для алмазного точения особо точных поверхностей:
 - в качестве опор исполнительных органов целесообразно использовать аэростатические,
 - привод шпинделя изделия должен иметь два источника энергии движения: мощный источник - для разгона и торможения шпинделя, отключаемый на время точения и маломощный источник - для обеспечения процесса точения,
 - в опорно-приводном узле подач необходим обязательный элемент - диссипативный демпфер, действующий в направлении подачи.
5. Показано, что жёсткость системы СПИД станка для ал-

мазного точения особо точных поверхностей несмотря на малые усилия резания /порядка 0,5 Н/ должна быть не меньше жёсткости системы СПИД станков нормальной и повышенной точности.

6. Разработан и исследован способ точения торцовых поверхностей с минимальным центральным дефектом. Показана возможность точения торцовых поверхностей с центральным дефектом диаметром менее 1 мкм и высотой менее 0,15 мкм.
7. Разработан способ токарной обработки, позволяющий на одном станке меняя только его настройку, получать плоские, сферические и несферические поверхности и разработан станок для алмазного точения плоских и сферических особо точных торцовых поверхностей по этому способу.
8. Теоретически получены и экспериментально проверены зависимости, определяющие влияние параметров настройки станка на точность формы и размера обработанных особо точных поверхностей второго порядка.
9. Выявлено замечательное свойство параметров настройки взаимно компенсировать погрешности обработанной поверхности. Показано, что возможна обработка сферической поверхности с наибольшим отклонением формы 0,01 мкм и отклонением размера 0,001%.
10. Разработана методика настройки параметров точности станка.
11. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований Московским станкостроительным заво-

дом "Красный пролетарий" созданы и введены в эксплуатацию на промышленных предприятиях и в научно-исследовательских институтах страны для решения важных народнохозяйственных проблем станки для алмазного точения особо точных поверхностей с высотой микронеровностей менее $0,01 \dots 0,05$ мкм и отклонением формы менее 1 угловой секунды:

- в 1975 году изготовлены опытный образец и промышленная партия /всего 6 шт/ специальных особо точных станков мод. МК 6511 /рис. I.6/ для алмазного точения дисков - годовой экономический эффект на 6 станков 1484 тыс. руб.
- в 1979 году изготовлены опытные образцы и промышленные партии /по 3 шт/ специальных особо точных станков мод. МК 6512 /рис. I.7/ для алмазного точения дисков - экономический эффект за весь срок службы одного станка 100681 руб. и мод. МК 6513 /рис. 5.1/ - экономический эффект за весь срок службы одного станка 740915 руб.
- в 1981 году изготовлен опытный образец специального станка мод. МК 6561 /рис. 5.2/ для алмазного растачивания - экономический эффект за весь срок службы станка 156972 руб.
- в 1981 году начато изготовление опытного образца и промышленной партии /всего 6 шт/ специальных сферотокарных особо точных станков мод. МК 6514 для алмазного точения /рис. 5.3/ - экономический эффект за весь срок службы одного станка 662967 руб.

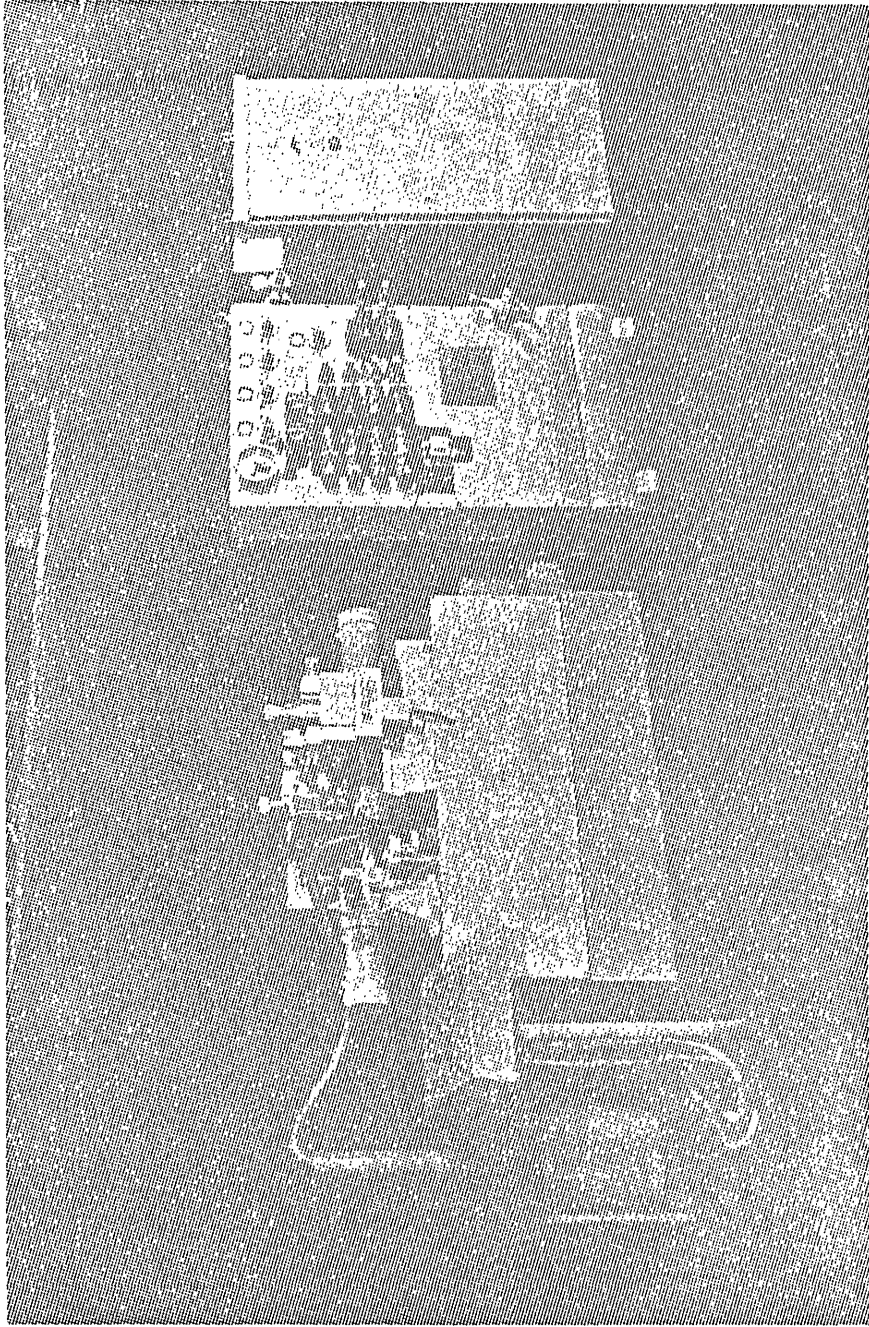


FIG. 1. GENERAL VIEW OF THE ENGINE. IN 650
 THE ENGINE IS SHOWN IN THE POSITION

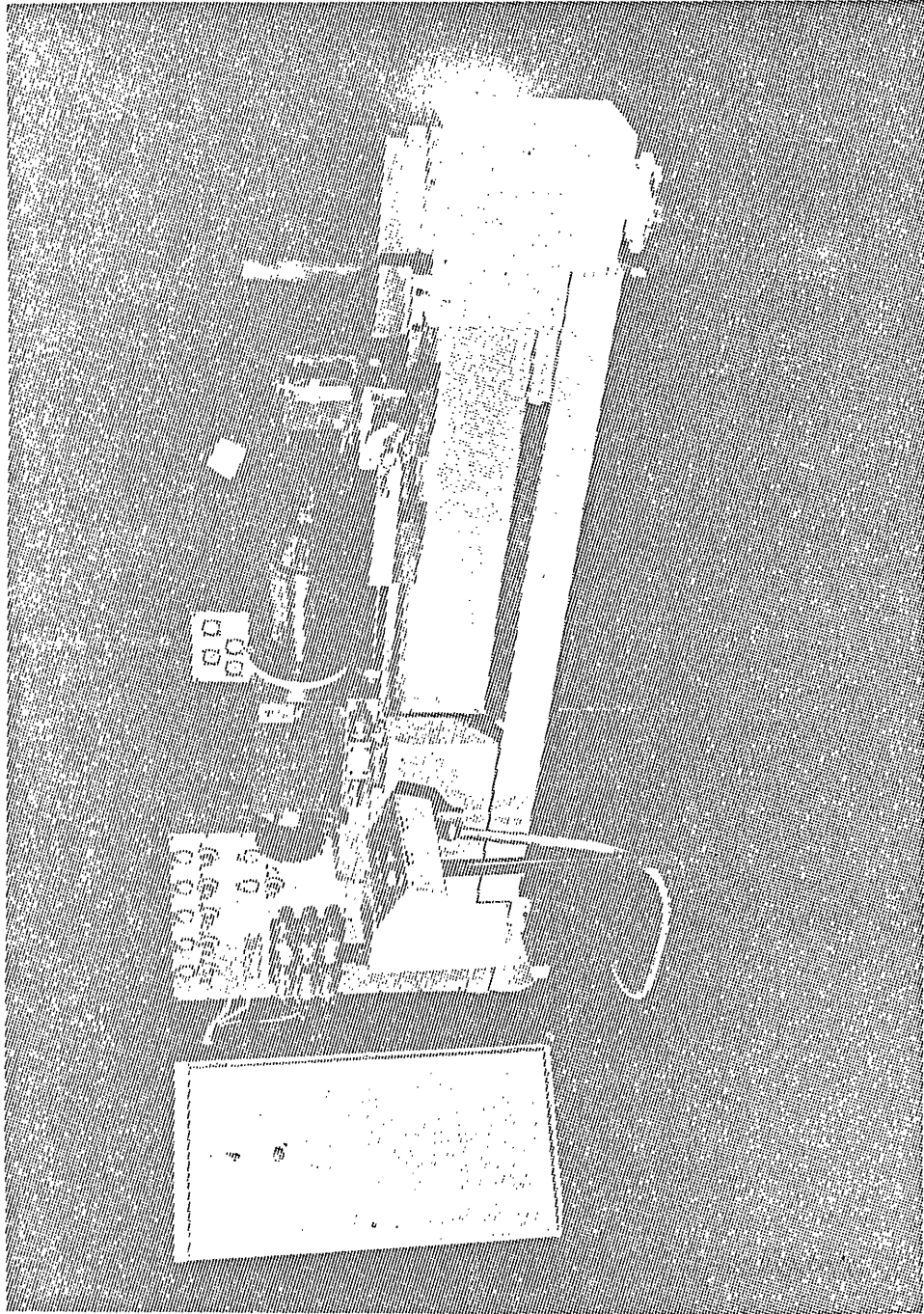


Рис. 5.2. Специальный станок мод. МК 656I
для алмазного растачивания.

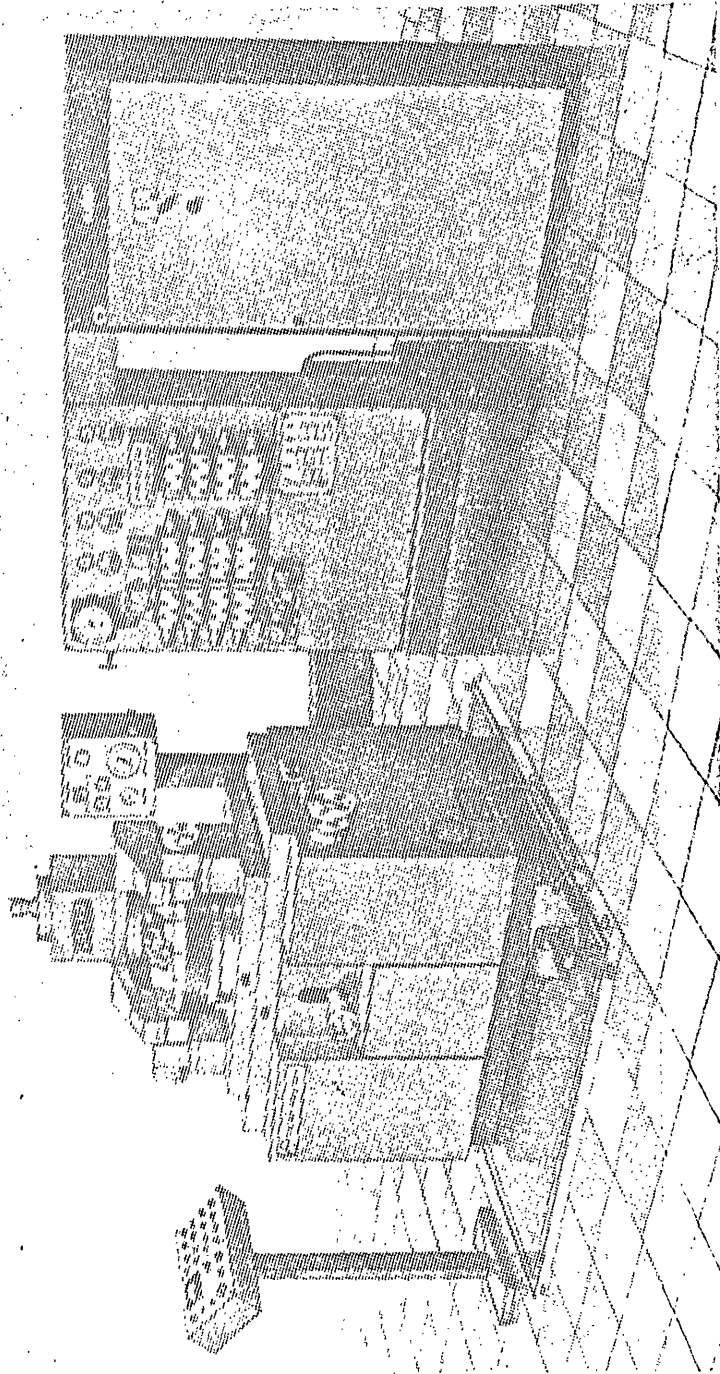


Рис. 5.3. Специальный сферотокарный осево точный станок
мод. МК 651А для алмазного точения.

- станок мод. МК 6511 демонстрировался:
- - на ВДНХ СССР на выставке "Достижения отечественного станкостроения", посвящённой 60-ти летию Великой Октябрьской социалистической революции в 1977 году, где постановлением Главного комитета ВДНХ СССР № 829л от 05.12.77 г. автор награждён золотой медалью.
- - на ВДНХ СССР на юбилейной выставке "Москва за 60 лет" в 1977 году.
- станок мод. МК 6512 демонстрировался на экспозиции станков МИНСТАНКОПРОМа в ЭНИМСе в 1980 г.

12. В целом для станкостроения создание станков для алмазного точения особо точных поверхностей открывает новые возможности в обработке металлов резанием с небывало высокой точностью и является реальной предпосылкой для резкого повышения точности и производительности в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акт приёмки опытных образцов специального высокоточного станка для алмазного точения дисков мод. МК 65II заводской комиссией. Завод "Красный пролетарий", 1975.
2. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии. М., "Наука", 1968.
3. Анализ конструкций алмазных резцов с радиусной режущей кромкой фирмы "R. Moos". ВНИИАЛМАЗ, 1977. Авт.: Головань А.Я., Иоффе М.М., Останин А.И., Лашко В.И., Дауге В.Т., Маринин Г.В.
4. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей. Л., "Машиностроение", 1978.
5. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. М., "Машиностроение", 1969.
6. Вибрации в технике. Справочник под ред. чл. корр. АН СССР Болотина В.В. т.1, М., "Машиностроение", 1978.
7. ГОСТ 8-77. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность.
8. Дружбинский И.А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках. М., "Машиностроение", 1965.
9. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некрутости поверхности. М., "Машиностроение", 1978.
10. Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. М., "Высшая школа", 1976.
11. Заказнов Н.П., Горелик В.В. Изготовление асферической оптики. М., "Машиностроение", 1978.

12. Иоффе М.М. и др. Алмазные резцы для обработки дисков магнитной памяти электронно-вычислительных машин. Сб. "Алмазы и сверхтвёрдые материалы". Вып.6. М., НИИМАШ, 1974.
13. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М., "Машиностроение", 1978.
14. Комбинированный привод шпинделя. Левшунов В.Т., Маринин Г.В., Минаев А.И., Шиманович М.А., Шисеев М.Д. Авт. св. № 770738, "Бюлл. изобр.", 1980, № 38.
15. Кошкин Н.И. и Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М., "Физматгиз", 1962.
16. Круглов Г.А. Обработка алмазными резцами деталей приборов. М., "Машиностроение", 1968.
17. Кудинов В.А. Динамика станков. М., "Машиностроение", 1967.
18. Кудинов В.А., Нис Д.А. и Рассохин В.Я. Вибрации и некруглость при тонком растачивании. "Станки и инструмент", 1969, № 6, с 8 - 11.
19. Леушина Т.М. Методы изготовления и контроля асферических поверхностей оптических деталей, основанные на исследовании их геометрических свойств. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М., МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977.
20. Магнитные и магнитогидродинамические опоры. Обзор. Составитель - Метлин В.Б. Под ред. д.т.н., проф. Бертинова А.А. М., "Энергия", 1968.
21. Маринин Г.В., Шиманович М.А. Влияние параметров настройки станка на точность обработанной сферической по-

- верхности. "Оптико-механическая промышленность", 1980, № I, с 31 - 33.
22. Металлорежущие станки. Под ред. Засл. деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., проф. Ачеркана Н.С. М., "Машиностроение", 1965, т. I, 2.
23. Мигулин В.В. и др. Основы теории колебаний. М., "Наука", 1978.
24. Оборудование для точения основы магнитных дисков алмазными резцами. Сб. "Алмазы и сверхтвёрдые материалы". М., НИИМАШ, 1974, № 10, с 5 - 7. Авт.: Кутейников В.Е., Несмелов А.Ф., Бальков А.Б., Лашко В.И., Найченко Л.И.
25. Опорно-приводной узел подачи. Горохов В.С., Кривов В.К., Маринин Г.В. Авт. св. № 770308.
26. Опорно-приводной узел подачи. Шиманович М.А., Маринин Г.В. Заявка № 2672111/08 от 09.10.1978. Положительное решение от 19.09.1979.
27. Опорный узел для возвратно-поступательного движения. Шиманович М.А., Левшунов В.Т. и Маринин Г.В. Авт. св. № 508599, "Бюлл. изобр.", 1976, № 12.
28. Отчёт о научно-исследовательской работе № 73-26. "Сравнительные исследования характеристик приводов главного движения станка мод. МК 6511". СТАНКИН, 1975. Авт.: Столбин Г.Б., Минасян А.Н.
29. Отчёт С 31-75. "Отработка методики испытания и отладки станка мод. МК 6511 на стенде для обработки дисков памяти и испытание вспомогательных узлов, комплектующих станок". Завод "Красный пролетарий", ЦЗЛ-2, 1975. Авт.: Шиманович М.А., Кривов В.К., Левит Д.Г., Маринин Г.В.

30. Отчёт С 30-77. "Об экспериментальной работе по алмазному точению сферических поверхностей". Завод "Красный пролетарий", ЦЗЛ-2, 1977. Авт.: Пуш В.Э., Шиманович М.А., Маринин Г.В., Горохов В.С., Королёв Ю.Н., Лашко В.И., Иоффе М.М.
31. Патент США № 3.305.282.
32. Патент ФРГ № 2114703.
33. Патент США № 3.472.565.
34. Ползун. Шиманович М.А. и Левшунов В.Т. Авт. св. № 476130, "Бюлл. изобр.", 1975, № 25.
35. Попов Л.В. Изготовление оптических деталей алмазным точением. "Оптико-механическая промышленность", 1978, № 10, с 44 - 47.
36. Протокол испытания поверхности ОМЗ Ø180 мм и Ø250 мм после алмазного точения. ЦКБ "Астрофизика", 1979.
37. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков. М., "Машиностроение", 1977.
38. Пуш В.Э. Малые перемещения в станках. М., "Машгиз", 1961.
39. Русинов М.М. Техническая оптика. М., "Машиностроение", 1979.
40. Способ повышения точности механической обработки. Шиманович М.А. и Маринин Г.В. Авт. св. № 584970, "Бюлл. изобр.", 1977, № 47.
41. Способ токарной обработки выпуклых /вогнутых/ торцовых поверхностей. Шиманович М.А., Марков А.А., Маринин Г.В., Левит Д.Г. Авт. св. № 526448, "Бюлл. изобр.", 1976, № 32.

42. Способ управления процессом высокоточной механической обработки и устройство для его осуществления.
Зелёный Н.М., Левшунов В.Т. и Маринин Г.В. Авт. св. № 774802, "Бюлл. изобр.", 1980, № 40.
43. Способ управления процессом механической обработки.
Шиманович М.А., Левит Д.Г. и Маринин Г.В. Авт. св. № 631261, "Бюлл. изобр.", 1978, № 41.
44. Сферотокарный станок. Маринин Г.В., Левшунов В.Т., Шиманович М.А., Панин В.Н., Горохов В.С., Проскурина С.Г., Ефремов М.С. Заявка № 2912251/08 от 18.04.1980.
45. Технология оптических деталей. Под ред. д.т.н. Семибратова М.Н. М., "Машиностроение", 1978.
46. Устройство для установки высокоточных машин. Маринин Г.В. и Морозов В.С. Авт. св. № 761223, "Бюлл. изобр.", 1980, № 33.
47. Устройство для получения асферических поверхностей.
Агашин М.Ф., Горелик В.В. Авт. св. № 448119, "Бюлл. изобр.", 1974, № 40.
48. Хрульков В.А., Головань А.Я., Федотов А.И. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении. М., "Машиностроение", 1977.

49. Bryan J.B. The Limits of Accuracy - "Modern Machine Shop", June 1975, Vol. 48, No.1, p.84-94.
50. Jan Taeyaerts. The Physical and chemical properties of diamonds: How they affect diamond cutting tools. - "Cutting tool engineering", USA, 1968, (s.l.), pp. 196-202.
51. Kosick M. New machine uses single crystal natural diamond for mirror-finish machining. - "Industrial Diamond Review", November, 1976, p.387-389.
52. Parts Machined to Optical-Quality Polished Finishes - "Machine Design", July 20, 1978, Vol.50, No.17, p.10.
53. Saito T.T. Machining of Optics: an introduction - "Applied Optics", 1975, Vol.14, No.8, p.1773-1776.
54. Whitten L.C. et al. Machining and measurement to submicron tolerances - Advances in Machine Tool Design and Research, 1966, p.491-513 (s.l.).
55. Williams R.L. and Warmbrod W.M. Mirror-Like Finishes Achieved by Microinch Machining - "Cutting Tool Engineer", November/December, 1973, p.4-7.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Ильина. Нарасова

DICTIONARY LIST

OPTIONS TAKEN ARE 60C,LIST,ERRS,OPT,STMT.

PARABO: PROCEDURE OPTIONS(MAIN);

```

1  PARABO: PROCEDURE OPTIONS(MAIN);
2  DECLARE CARD FILE RECORD INPUT ENVIRONMENT(F(80))
3  MEDIUM (SYSIPT,50(12));
   DECLARE I STR;
   2 RU FIXED DECIMAL(4);
   2 PP FIXED DECIMAL(8);
   2 XD PICTURE'99V.99';
   2 YO PICTURE'99V.99';
   2 BET;
   3 GR FIXED DECIMAL(1);
   3 HM FIXED DECIMAL(2);
   3 SEK PICTURE'99V.99';
   2 YV PICTURE'99V.99';
   2 YV YMAX FIXED DECIMAL(4);
4  2 PUSTO CHARACTER(4);
   DECLARE B3 CHARACTER(80);
   (K,TA,PI,SA,CO,AL,LI,YI,YHA) FLOAT DECIMAL(12);
   (SIB,COB,KP,X,Y,Z,R,P3L,Z8L; DLZ) FLOAT DECIMAL(15);
   RD(30) FLOAT DECIMAL(15); ZD(30) FLOAT DECIMAL(15);
   RP FIXED DECIMAL(2);
   OPEN FILE(CARD);
   ON ENDFILE(CARD) GOTO FIN;
   HACH: READ FILE(CARD) INTO(BB);
   GET STRING(BB,EDIT(STR))=(4);F(8);F(5;2);F(1);F(2);
   2F(15;2);F(4);A(4));
   PUT EDIT(STR)(SKIP,F(4);X(2);F(8);2IX(2);P(5;2);X(2);F(1);F(2);
   2(X(2);F(5;2);X(2);F(4);A(4)));
   YP=0; IS=0; P=PP; YI=YV; YMA=YMAX; RP=0;
   K=RU**2/PI; TA=RJ/PI;
   AT=ATAND(TA); SIA=SIND(AT); COA=COSS(AT);
   A=SQRT(RU**2-K**2);
   LL=GR+MIM/60*SEK/3600; SIB=SIND(LL); COB=COSD(LL);
   HAI: IF YP>YMA THEN GOTO HA2;
   KP=SQRT(1-YP**2/RJ**2);
   XP=A*(1-KP);
   X=XP*COA-SIA*SIB*YP*XD;
   Y=COB*YP*YD; Z=XP*SIA+P*COA*SIB;
   R=SQRT(X**2+Y**2);
   PUT EDIT('X=',Y,'Y=',Y,'R=',R,'Z=',Z)(SKIP,4(A);F(14;9);X(2));
   I=I+1; RP=RP+1; RD(I); ZD(I);
   PUT EDIT('Y=',YPI(X(2);A);F(5;1));
   YP=YP+YI;
   GOTO HAI;
   HA2: PBL=R**2/(2*Z);
   PUT EDIT('PBL=',PBL)(SKIP,A);F(13;3));
   I=I; RP=RP+1;
   DO WHILE(I<RP);
   ZBL=RD(I**2/2*PBL); DLZ=ZD(I)-ZBL;
   PUT EDIT('I=',I,'R=',R,'Z=',ZD(I);Z8='ZBL';DLZ='DLZ);
   (SKIP,A);F(2);A;X(2);A);F(15;9));
   GOTO HACH;
   END;

```

"Утверждаю"

Главный инженер

Московского станкостроительного
завода "Красный пролетарий"



им. А.И. Горюмова

В.П. Бонцарев

14 августа 1981 г.

Акт

об использовании результатов диссертационной работы аспиранта СГАНКИНа тов. Маринина Г.В. при проектировании и отладке станков для алмазного точения особо точных поверхностей.

Настоящий акт составлен в том, что результаты работы аспиранта Маринина Геннадия Васильевича были использованы при проектировании и отладке станков для алмазного точения особо точных поверхностей - мод. МК 6511, мод. МК 6512, мод. МК 6513, мод. МК 6561, мод. МК 6514, мод. МК 6562.

Главный конструктор

Начальник ЦЗЛ-2

Ю.М. Жель

В.Т. Дауге

Т. Врублевский 2а
Борисович и
Судинский



МИНИСТЕРСТВО
СТАНКОСТРОИТЕЛЬНОЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

№ 11-80-2572

19. 11. 1976 г.

Б. Врублевский
Судинский
[Handwritten signatures]

ДИРЕКТОРУ МОСКОВСКОГО СТАНКОЗАВОДА

"Красный Пролетарий" им. Ефремова

гос. Королеву О.А.

В соответствии с утвержденным на 1975 год перечнем тем по плану развития и внедрения новой техники и положением о премировании работников предприятий и организаций за разработку и внедрение новой техники, за выполнение работ по теме:

Станок особо точный для алмазной обработки дисков
памяти ЭВМ мод. МК-6511

с экономическим эффектом 1434,0 т. руб., утверждена премия в сумме 28600 руб. 2 % от экономического эффекта, в т.ч. за проектирование 10038 руб. 35 % от суммы премии 28600 руб.

Премия подлежит выплате согласно положению о разбивке по следующим этапам:

- за разработку рабочего проекта 5018^{X)} руб. 17,5^{X)} % от 28600 руб.
- за выпуск опытного образца 5736 руб. 20 % от 28600 руб.
- за освоение серийного производства 22000 руб. 45 % от 28600 руб.

За выполнение и установленный срок _____ квартала 1975 года этап работы:

изготовление и испытание опытных образцов и изготовление первой промышленной серии

разрешая и выплате работникам Московского станкозавода "Красный Пролетарий" им. Ефремова премии в размере 23661 рублей.

Выплату премии произвести в соответствии с действующими положениями о премировании из централизованного фонда Главного управления.

X) Согласно приказу Минстанкопрома от 31.08.1976г. №225 премия снижается на 50% за перенос сроков выполнения задания.

Начальник Главного управления по производству электромеханических машин и универсальных станков

[Handwritten signature]

23/11/76

[Handwritten notes and signatures]

Информационная карта

расчета экономической эффективности и цен новой продукции

| Показатели | Ед. изм. | Новое изделие | Базисное изделие |
|---|----------|---------------|----------------------|
| 1. Наименование изделия | | Станок МК6512 | Станок ШП350М ШП700М |
| 2. Тип, модель, марка | | | |
| 3. Категория качества | | | |
| 4. Верхний предел цены (Цв.п.) | руб | 174352 | |
| $Ц_{в.п.} = Ц_б \times \frac{П_н}{П_б} \times \frac{\frac{1}{T_б} + E}{\frac{1}{T_н} + E} + \frac{И_б - И_н}{\frac{1}{T_н} + E} + \Delta K$ | | | |
| где: $П_н; П_б$ - годовой объем продукции | | | $\beta = 5,66^{\%}$ |
| $T_н; T_б$ - срок службы изделия | | лет | 10 4,5 |
| $И_н; И_б$ - текущие затраты потребителя | | руб | 7645 43002 |
| ΔK - изменение капитальных затрат у потребителя | | руб | |
| 5. Цена базисного изделия (Цб) | руб | | 3900 ^{жж} |
| 6. Лимитная цена (Цл) $Ц_л = Ц_{в.п.} \times \beta; \beta = 0,8$ | руб | 139481 | 3900 |
| 7. Проектная себестоимость (Сп) | руб | 32306 | |
| 8. Отраслевой норматив рентабельности (Р) | % | 20,1 | |
| 9. Проектная цена (Цп) (без надбавки за эффективность) | руб | 38800 | |
| $Ц_п = С_п \times (1 + Р)$ | | | |
| 10. Экономический эффект (Э) $Э = Ц_л - Ц_п$ | руб | 100681 | |
| 11. Надбавка к цене (Нп) | руб | 2910 | |
| 12. Проектная цена (Цоп) (с надбавкой за эффективность) | руб | 41710 | |
| $Ц_{оп} = Ц_п + Н_п$ | | | |

13. Рекомендации приемочной комиссии по категориям качества нового изделия и сроку проведения аттестации.
 * См. расчет экономической эффективности "6512, 000, 000, 000 РР20"
 ** В формуле участвует 22113 руб. см. расчет "6512, 000, 000, 000 РР20"

Завод "Красный пролетарий" Главный инженер Бандарев

Члены приемочной комиссии

| | | |
|-----------------------|---------------------------------------|--|
| Председатель комиссии | Руководитель гр. п/я Лашко В.И. | |
| | Руководитель гр. - ПРТМ Тварюнас В.А. | |
| | Начальник КТОС Алешина В.А. | |
| | Начальник ОТК Самонин И.Г. | |

Согласовано Гл. инженер ПРТМ Ульявичус 20. 05. 79.

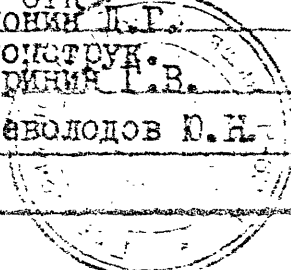
Дата пост. Подпись и дата Взамен шифр Шифр и дата Дата пост.

ИНФОРМАЦИОННАЯ КАРТА
расчета экономической эффективности и цен новой продукции

| Показатели | Ед. изм. | Новое изделие | Базисное изделие |
|---|----------|---------------|------------------|
| 1. Наименование изделия | | Станок МК6513 | Станок ШПЦ-500 |
| 2. Тип, модель, марка | | | |
| 3. Категория качества | | | |
| 4. Верхний предел цены (Ц _{в.п.}) | р. б | 975644 | |
| $Ц_{в.п.} = Ц_0 \times \frac{P_H}{P_0} \times \frac{\frac{I}{T_0} + E}{\frac{I}{T_H} + E} + \frac{I_0 - I_H}{\frac{I}{T_H} + E} \pm \Delta K$ | | | |
| где: P _H ; P ₀ - годовой объем продукции T _H ; T ₀ - срок службы изделия I _H ; I ₀ - текущие затраты потребителя ΔK - изменение капитальных затрат у потребителя | | | |
| 5. Цена базисного изделия (Ц ₀) | руб | | 4000 |
| 6. Лимитная цена (Ц _л) Ц _л = Ц _{в.п.} × B; B = 0,8 | руб | 780515 | |
| 7. Проектная себестоимость (С _п) | руб | 32951 | |
| 8. Отраслевой норматив рентабельности (P) | % | 20,2 | |
| 9. Проектная цена (Ц _п) (без надбавки за эффективность) Ц _п = С _п × (1 + P) | руб | 39600 | |
| 10. Экономический эффект (Э) Э = Ц _л - Ц _п | руб | 740915 | |
| 11. Надбавка к цене (Н _п) | руб | 2970 | |
| 12. Проектная цена (Ц _{оп}) (с надбавкой за эффективность) Ц _{оп} = Ц _п + Н _п | руб | 42570 | |

13. Рекомендации приемочной комиссии по категории качества нового изделия и сроку проведения аттестации
 * См. расчет экономической эффективности "6513.000000.000 PP20"

| | | | |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Завод "Красный пролетарий" | Главный инженер завода БОНДАРЕВ В.И. | | |
| Члены приемочной комиссии | | | |
| Председатель комиссии | Руковод. гр. п/я Р-6324 Лашко В.И. | | |
| | /Начальник КТОС Алешкина В.А. | | |
| | Начальник ОТК Самонин П.Г. | | |
| | Ведущий конструктор Медведев Г.В. | | |
| Согласовано: Гл. инженер п/я Р-6324 | Всеволодов Ю.Н. | | |



расчета экономической эффективности и цен новой продукции

| Показатели | Ед. изм. | Новое изделие | Базисное изделие |
|--|----------|----------------|------------------|
| 1. Наименование изделия | | станок | станок |
| 2. Тип, модель, марка | | МК656I | 16K20B |
| 3. Категория качества | | высшая | |
| 4. Верхний предел цены (Ц _{в.п.}) | руб. | 166994 | |
| $Ц_{в.п.} = Ц_б \times \frac{П_n}{П_б} \times \frac{\frac{I}{T_б} + E_n}{\frac{I}{T_n} + E_n} + \frac{И_б - И_n}{\frac{I}{T_n} + E_n}$ | | | |
| где: П _n ; П _б - годовой объем продукции; $\frac{П_n}{П_б} = \beta$ | шт. | $\beta = 5,51$ | |
| Т _n ; Т _б - срок службы изделия | лет | 10 | 10 |
| И _n ; И _б - текущие затраты потребителя | руб. | 4930,23 | 29184,6 |
| 5. Цена базисного изделия (Ц _б) | руб. | | 12700 |
| 6. Лимитная цена (Ц _л) Ц _л =Ц _в п х В; | руб. | 133595 | |
| 7. Проектная себестоимость (С _п) | руб. | 48633 | |
| 8. Отраслевой норматив рентабельности (Р) | % | 19,9 | |
| 9. Проектная цена (Ц _п) (без надбавки за эффективность) | руб. | 58300 | |
| 10. Годовой экономический эффект (Э) | руб. | 156972,0 | |
| 11. Надбавка к цене (Н _п) | руб. | | |
| 12. Проектная цена (Ц _{оп}) (с надбавкой за эффективность) Ц _{оп} =Ц _п +Н _п | руб. | | |
| 13. Рекомендации приемочной комиссии по категориям качества нового изделия и сроку проведения аттестации. | | | |



Директор завода "Красный пролетарий"

[Signature] /КОРОЛЕВ О.А./

Главный конструктор завода "Красный пролетарий"

[Signature] /ЖЕЛЬ Ю.М./

Согласовано:

Зам.директора п/я В-8685

[Signature] /Макаров А.А./

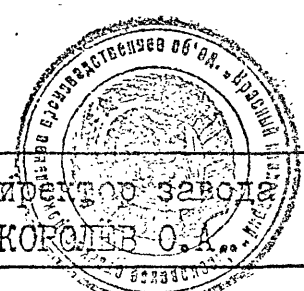
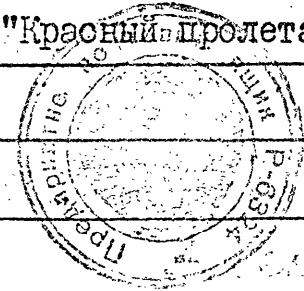
[Handwritten notes and signatures]
9205-817

ИНФОРМАЦИОННАЯ КАРТА

расчёта экономической эффективности и цен новой продукции

| Показатель | Ед. изм. | Новое изделие | Базисное изделие |
|--|----------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1. Наименование изделия | | СПЕЦ. ТОК. станок МК65I4 высшая | ПОЛИРОВ. доводоч. ст. ШПД-500 |
| 2. Тип, модель, марка | | | |
| 3. Категория качества | | | |
| 4. Верхний предел цены (П _{в.п.}) | руб. | 607166 | |
| $P_{в.п.} = P_0 \times \frac{P_H}{P_0} \times \frac{\frac{1}{T_0} + E_H}{\frac{1}{T_H} + E_H} + \frac{I_0 - I_H}{\frac{1}{T_H} + E_H}$ | | | |
| где: P _H ; P ₀ - годовой объём продукции $\beta = \frac{P_H}{P_0}$ | шт. | $\beta = 30,0$ | |
| T _H ; T ₀ - срок службы изделия | лет | 10 | 7 |
| I _H ; I ₀ - текущие затраты потребителя | руб. | 5642 | 122290 |
| 5. Цена базисного изделия (P ₀) | руб. | | 4000 |
| 6. Лимитная цена (P _л) P _л = P _{в.п.} x B; | руб. | 485733 | |
| 7. Проектная себестоимость (C _п) | руб. | 56788 | |
| 8. Отраслевой норматив рентабельности (P) | % | 20 | |
| 9. Проектная цена (P _п) (без надбавки за эффективность) $P_{п} = C_{п} \times (1 + P)$ | руб. | 68100 | |
| 10. Годовой экономический эффект от выпуска и использования единицы продукции (Э) | руб. | 662967 | |
| 11. Надбавка к цене (H _п) | руб. | | |
| 12. Проектная цена (P _{оп}) (с надбавкой за эффективность) $P_{оп} = P_{п} + H_{п}$ | руб. | | |
| 13. Рекомендации приемочной комиссии по категориям качества нового изделия и сроку проведения аттестации | | | |

Имя, № и д. пр. Подпись и дата
Имя, № дубли. Подпись и дата
Имя, № дубли. Подпись и дата

| | | | |
|----------------------------|---|----------------------|-----------------|
| Завод "Красный пролетарий" |  Директор завода КОРОЛЕВ О.А. | | |
| /Главный конструктор з-да | "Красный пролетарий" | <i>Алексеев В.А.</i> | Жедь Ю.М./ |
| Согласовано: | | | |
| Главный инженер п/я Р-6324 |  | | /Билибин С.В./ |
| Начальник СТБ | | | /Алексеев В.А./ |

МК65I4.000000.000PPI0