

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Индекс 3624

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ им. Д.В. ЕФРЕМОВА»

А.А.Будтов, В.А.Груздев, А.А.Ловыгин, Г.В. Маринин,
В.И.Пономаренко, В.И. Петров, Ю.А.Свистунов

Развитие технологии изготовления структуры
с ПОКФ на частоте 433 МГц

Препринт

А.А.Будтов, В.А.Груздев, А.А.Ловыгин, Г.В. Маринин, В.И.Пономаренко, В.И. Петров, Ю.А.Свистанов
 Развитие технологии изготовления структуры с ПОКФ на частоте 433 МГц. —
 Препринт НИИЭФА П-0994. СПб.: ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», 2005, 12с., с ил.

Описаны работы по развитию технологии изготовления структур с ПОКФ на рабочей частоте 433 МГц с целью использования их в различных ускорительных комплексах прикладного назначения. Представлен краткий обзор мер, необходимых для удовлетворения требуемым допускам на погрешности геометрии резонатора, обсуждаются результаты выполнения программы соответствующих мероприятий. Дан анализ погрешностей изготовленных электродов экспериментальной протонной секции из алюминиевого сплава на энергию 1 МэВ.

В НПК ЛУЦ НИИЭФА ведутся работы по развитию технологии изготовления структур с ПОКФ на рабочей частоте 433 МГц. Общий вид и поперечное сечение одного из таких изделий представлены на рис. 1 и 2.

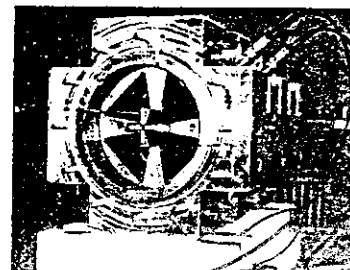


Рис. 1



Рис. 2

Эксплуатация этих изделий требует выполнения ряда известных требований, в частности, формирования рабочего типа колебаний с необходимой точностью квадрупольной симметрии, обеспечения отсутствия явлений ВЧ-пробоя и наличия достаточно высокой добротности электромагнитных колебаний.

Реализация перечисленных требований вызвала наибольшие трудности при изготовлении этого изделия.

Требование к точности квадрупольной симметрии электромагнитного поля диктуется необходимостью достижения расчетных параметров ускоряемого пучка, а также обеспечения отсутствия ВЧ-пробоя. Эта точность определяется, прежде всего, отклонениями вершин электродов от их номинальных положений.

На рис. 3 и 4 приведен результат расчета магнитного поля в резонаторе с идеально точной квадрупольной симметрией. Рис. 5 и 6 представляют аналогичный расчет для резонатора со смещенным верхним электродом: приосевая вершина электрода смещена вправо на расстояние 20 мкм, что составляет менее 1% от расстояния между соседними электродами, равного 2,899 мкм (видно явное нарушение квадрупольной симметрии поля).

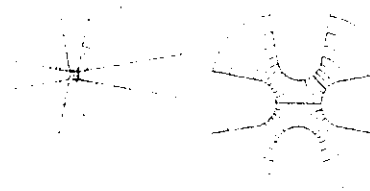


Рис. 3

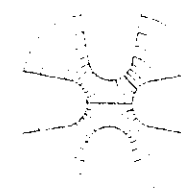


Рис. 4

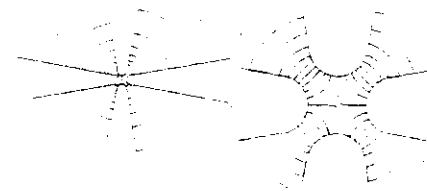


Рис. 5



Рис. 6

Критическими параметрами, определяющими точность квадрупольной симметрии поля, являются погрешности величин зазоров между вершинами модулированных поверхностей соседних и противоположных электродов. Геометрический анализ размерных цепей показал, что наибольшее отклонение величин зазоров от номинального размера между соседними электродами не должно превышать ± 25 мкм, а между

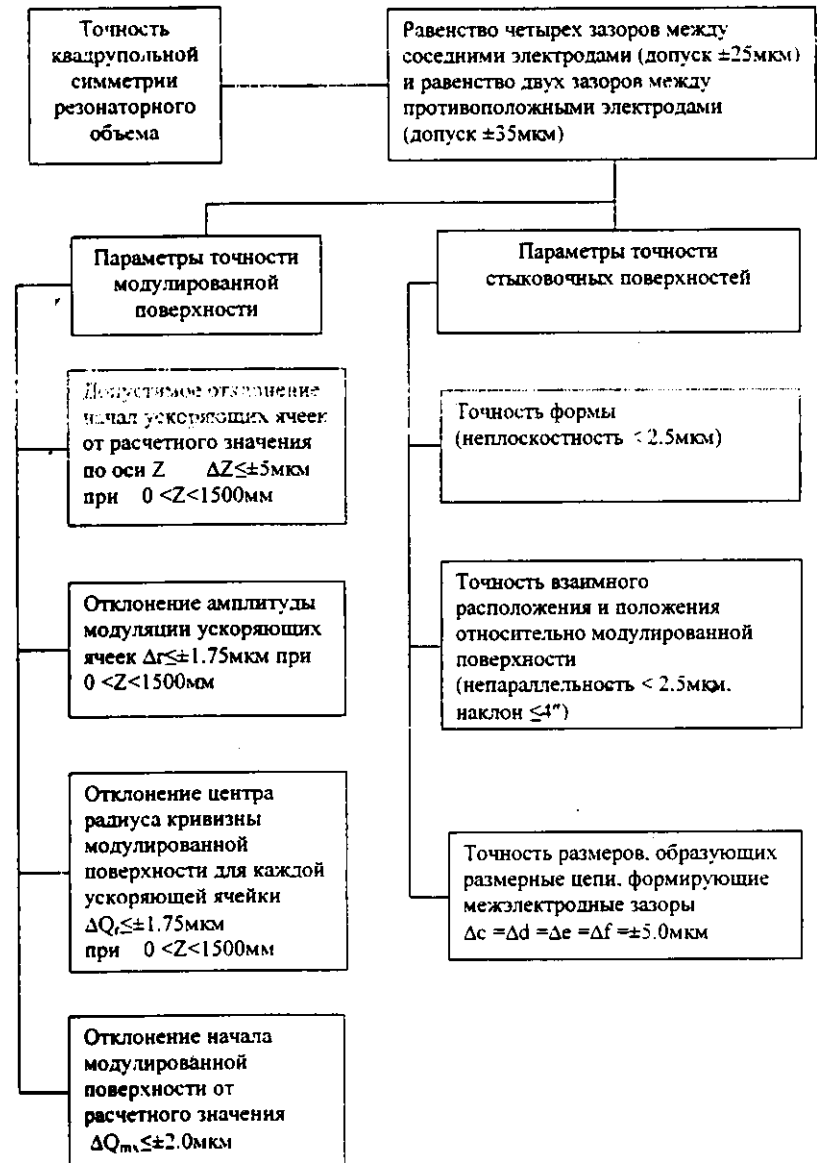
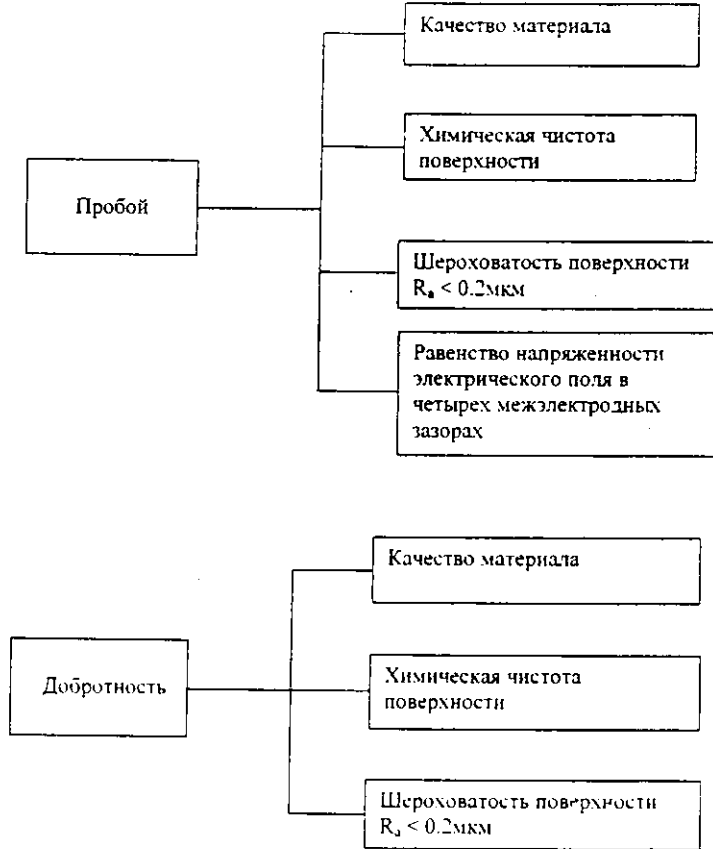
противоположными $\pm 35 \mu\text{м}$ (в плоскости квадрупольной симметрии для каждой ускоряющей ячейки).

Достаточная надежность работы ускоряющей структуры в отношении явлений пробоя обеспечивается выполнением ряда известных условий:

- использование материала соответствующего качества (однородность структуры, отсутствие пор и раковин, твердых и инородных включений),
- химическая чистота поверхностей рабочего объема,
- реализация достаточно низкого уровня шероховатости поверхности в приосевой области, где наиболее велика вероятность пробоя (не ниже 10-го класса чистоты; $R_a = 0.2 \mu\text{м}$).

Требование к низкому уровню шероховатости остальных обрабатываемых поверхностей диктуется необходимостью достижения высокой добротности возбуждаемых колебаний (не ниже 10-го класса чистоты; $R_a = 0.2 \mu\text{м}$).

Далее связи физических параметров с параметрами изготовления отражены в виде схем.



С момента приобретения станка MS328 появилась возможность существенного усовершенствования технологии изготовления структур с ПОКФ, и приобретение алмазного инструмента явилось первым шагом на этом пути.

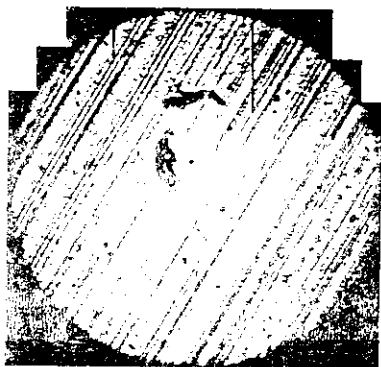


Рис. 7

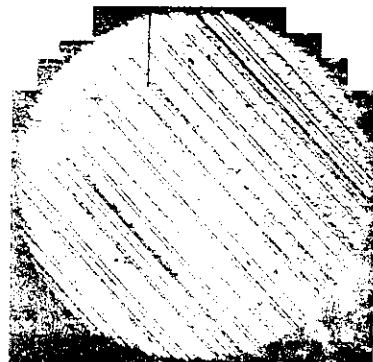


Рис. 8

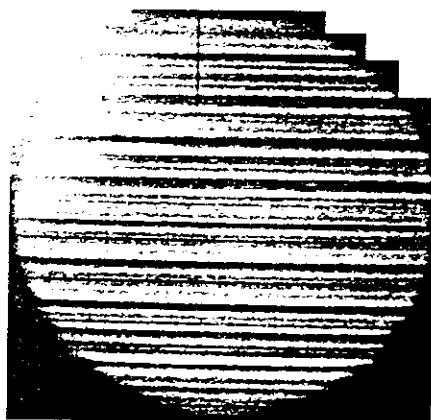


Рис. 9

Обработка материала изделия алмазным режущим инструментом позволяет решить две основных задачи:

- обеспечение низкого уровня шероховатости обрабатываемой поверхности ($R_z = 0,2$ мкм или 12-й класс чистоты); это дает возможность увидеть истинную геометрию изделия с необходимой точностью;
- реализация высокой стойкости инструмента, что позволяет вести длительную обработку материала без износа инструмента, обеспечивая точность изготовления формы изделия на микроном и субмикронном уровнях.

Решение этих задач позволяет вести обработку с необходимой точностью стыковочных поверхностей электродов и поверхностей технологических и метрологических баз.

обработку с необходимой точностью и низким уровнем шероховатости модулированных поверхностей электродов, а также обеспечить необходимый уровень шероховатости поверхностей, влияющих на величину добротности возбуждаемых электромагнитных колебаний.

С использованием алмазного инструмента были проведены тестовые обработки материалов, используемых при изготовлении структур с ПОКФ. К настоящему времени это алюминиевый сплав марки Д16, сплав из хромистой бронзы марки БрХ1. Кроме того, провели тестовую обработку образца из бескислородной меди марки МОБ. На рис. 7, 8 и 9 соответственно изображены фотографии обработанных поверхностей алюминиевого сплава Д16, медного сплава БрХ-1 и образца из бескислородной меди МОБ.

Анализ профилограмм, снятых на профилометре, показал, что алмазная фреза испытывает вертикальные колебания размахом порядка 10 мкм (см. рис. 10). Обработка длинных поверхностей (~1500 мм) показала наличие также медленного дрейфа в вертикальном направлении.

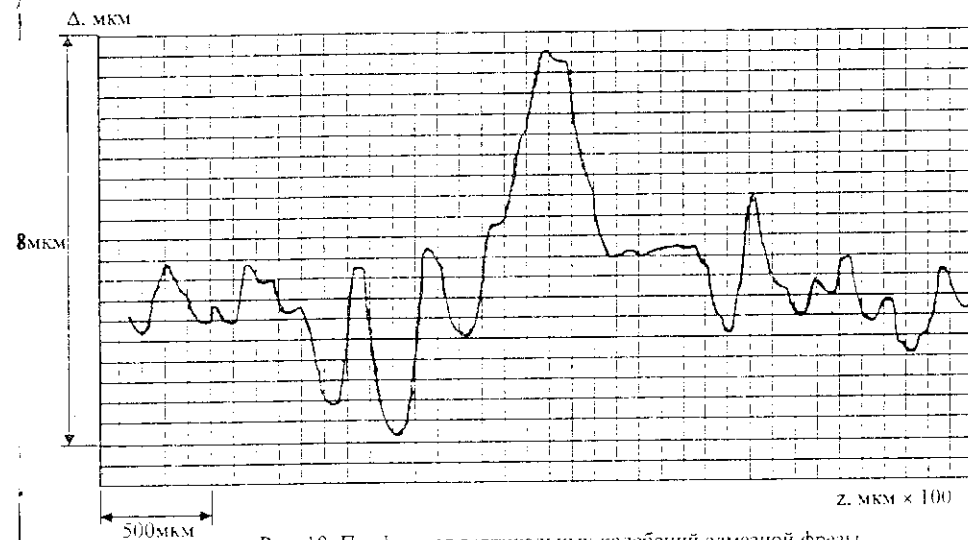


Рис. 10. Профиль от вертикальных колебаний алмазной фрезы

Так как геометрический анализ размерных цепей изделия выявил необходимость изготовления стыковочных поверхностей изделия с неплоскостностью не хуже 2,5 мкм на длине 1500 мм и точностью изготовления размерных, влияющих размерных цепей, не хуже ± 5 мкм, стала очевидной несовместимость этих требований с существующим 10-микронным диапазоном колебаний режущего инструмента. Устранить эту несовместимость могло лишь уменьшение диапазона колебаний фрезы с 10 до 1 мкм, а в перспективе до долей микрона.

Для выявления путей решения этой проблемы были предприняты исследования, позволившие определить основные источники колебаний, сообщаемых режущему инструменту.

На рис. 11, 12 и 13 представлены характерные вертикальные колебания (по оси Z) при измерении фиксированной координаты Z с помощью штатной измерительной системы станка за период времени примерно 10 мин (цикл из 80 измерений).

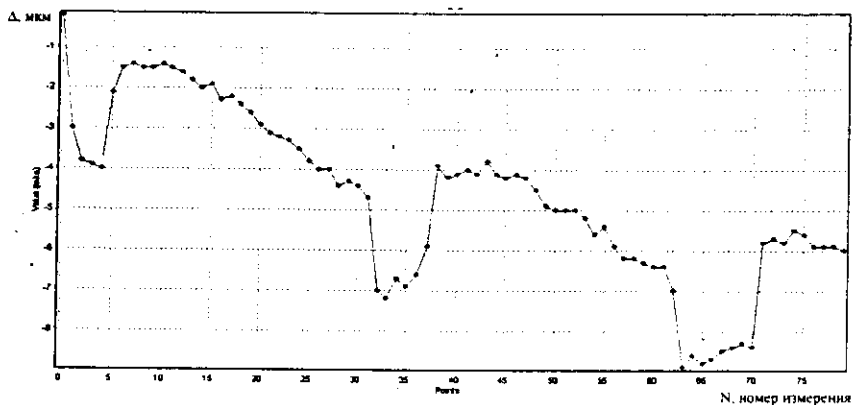


Рис. 11. Медленный дрейф измеряемых значений

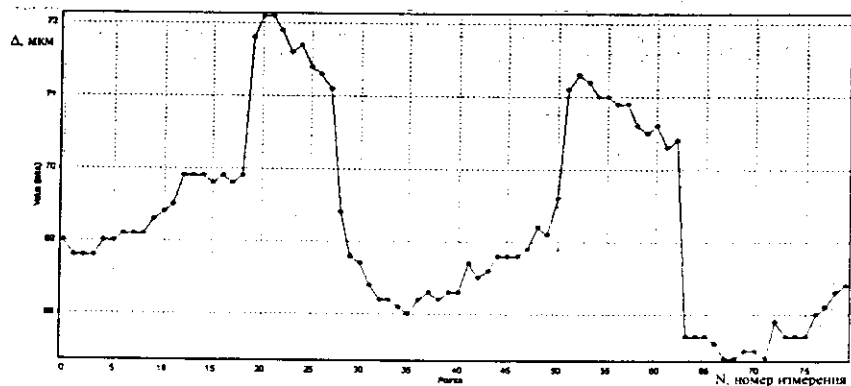


Рис. 12. Скачкообразные отклонения измеряемых значений

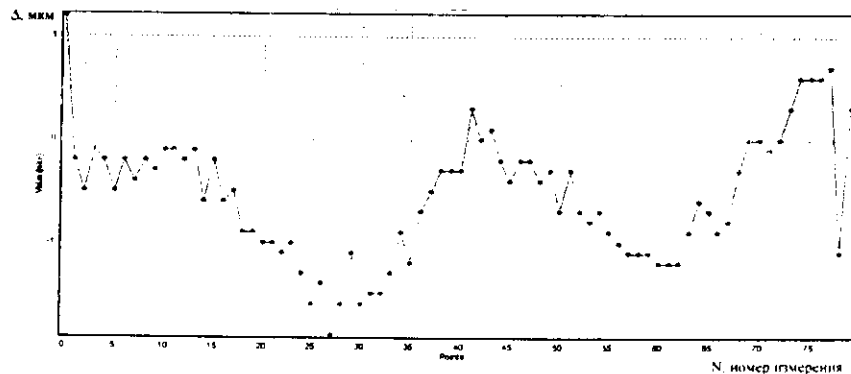


Рис. 13. Волнообразные отклонения измеряемых значений

На рис. 11 хорошо виден медленный дрейф значений, снимаемых в процессе измерений в фиксированной точке. Рис. 12 иллюстрирует скачкообразное отклонение измеряемых значений. На рис. 13 отображена волнообразная составляющая отклонения измеряемых значений в фиксированной точке.

Опираясь на эти результаты и результаты измерений, снятых со штатных датчиков температуры некоторых узлов станка, сформировали стратегию поиска доминирующих источников фиксируемых отклонений.

В табл. 1 представлены характерные величины доминирующих погрешностей выявленных на этапе начальных исследований.

Таблица 1

| Погрешности | Погрешности В исходном состоянии станка, мкм | |
|--|---|------|
| | Z | Y |
| Оси | | |
| Скачкообразная погрешность | 2,5 | 3,0 |
| Волнообразная погрешность | 2,0 | 2,8 |
| Погрешность в виде уклона за 10 мин | 5,0 | 5,0 |
| Суммарная погрешность за 10 мин | 9,5 | 10,8 |

Более тщательные исследования показали, что

- скачкообразная погрешность вызвана автоматической коррекцией температурных деформаций по осям Z и Y и регулируется в контроллере PLC параметрами:
4210.5 по оси Y
4210.6 по оси Z
с временем коррекции до 5 с;

- волнообразная погрешность обусловлена температурными деформациями элементов станка, вызванными колебанием температуры масла в гидросистеме станка при управлении работой холодильного агрегата от контроллера PLC; режим работы холодильного агрегата формируется параметрами:

4220.1 – температура включения.

4220.2 – температура отключения

и алгоритмом контроллера PLC (полный период изменения температуры масла до 5 мин);

- погрешность в виде уклона обусловлена температурными деформациями элементов станка, вызванными изменениями температуры в помещении (период изменения температуры в помещении более 10 мин).

Скачкообразную погрешность удалось устранить подбором параметров 4210.5 и 4210.6 в контроллере PLC (см. рис. 14).

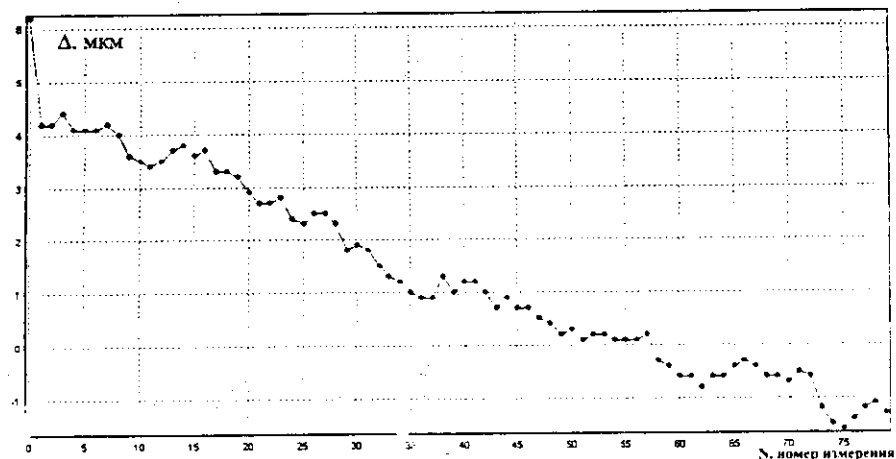


Рис. 14. Результат устранения скачкообразных отклонений при измерениях

Необходимость уменьшения волнообразной погрешности потребовала детального изучения работы отдельных узлов и систем станка, что позволило выявить схемы функционирования этих узлов и систем на аппаратном и программном уровнях. На рис. 18 представлена диаграмма, отражающая температурные изменения в различных узлах станка и в помещении и временной цикл включения и выключения компрессора гидростанции станка. Анализ накопленных диаграмм позволил сформировать конкретные предложения по изменению режимов работы системы температурной стабилизации узлов станка. Вначале была предпринята попытка решения проблемы только программными средствами (параметры 4220.1 и 4220.2 в контроллере PLC), но это не позволило

T, °C

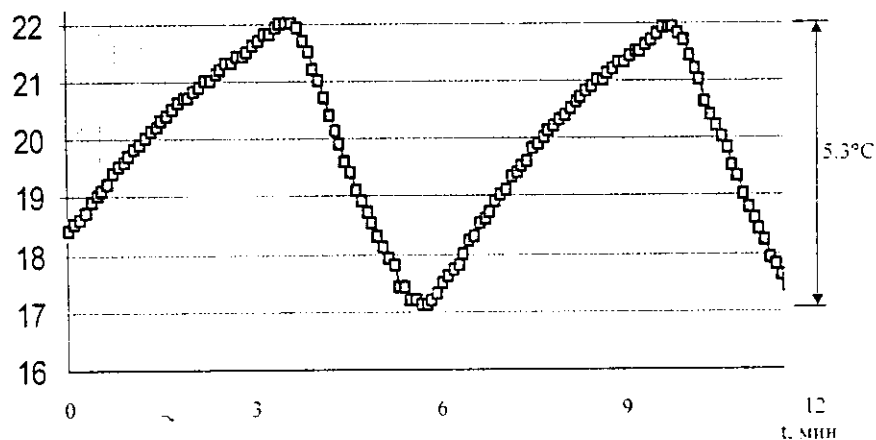


Рис. 15. Колебания температуры хладагента в исходном состоянии станка

T, °C

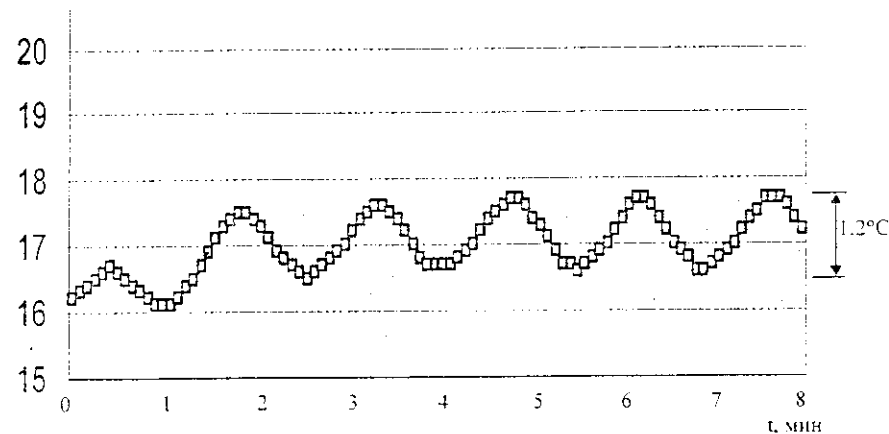


Рис. 16. Колебания температуры хладагента в измененном состоянии станка

достигнуть желаемого результата. Решение проблемы с помощью использования дополнительного оборудования, оптимизирующего временной цикл функционирования этой системы, оказалось успешным. В частности, была предложена схема, реализующая внешнее управление включением и выключением компрессора гидростанции станка. Внедрение этого решения позволило уменьшить диапазон колебаний температуры хладагента в системе с 5.3 до 1.2°C и соответственно уменьшить величину волнообразной компоненты погрешности с 2 до 0.4мкм по координате Z и с 2.8 до 0.8мкм по координате Y.

На рисунке 15 и 16 представлены диаграммы, иллюстрирующие колебания температуры хладагента гидросистемы станка до подключения внешнего управления и после. Рисунок 17 отражает уменьшение волнообразной погрешности до 0.4мкм.

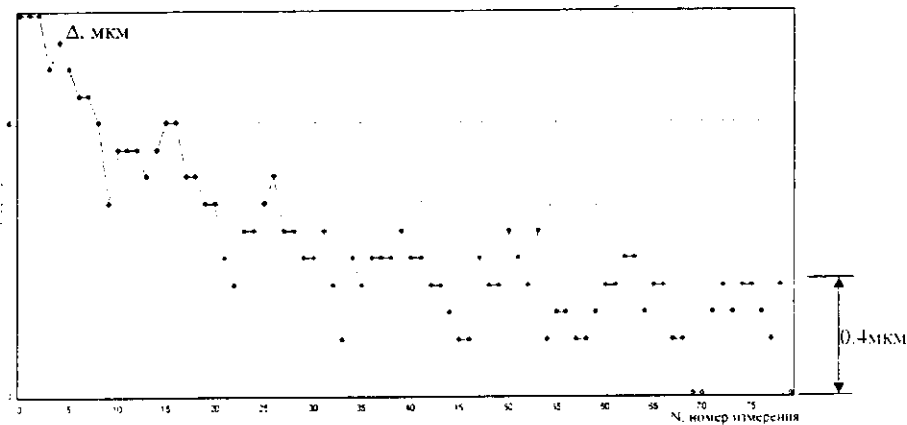
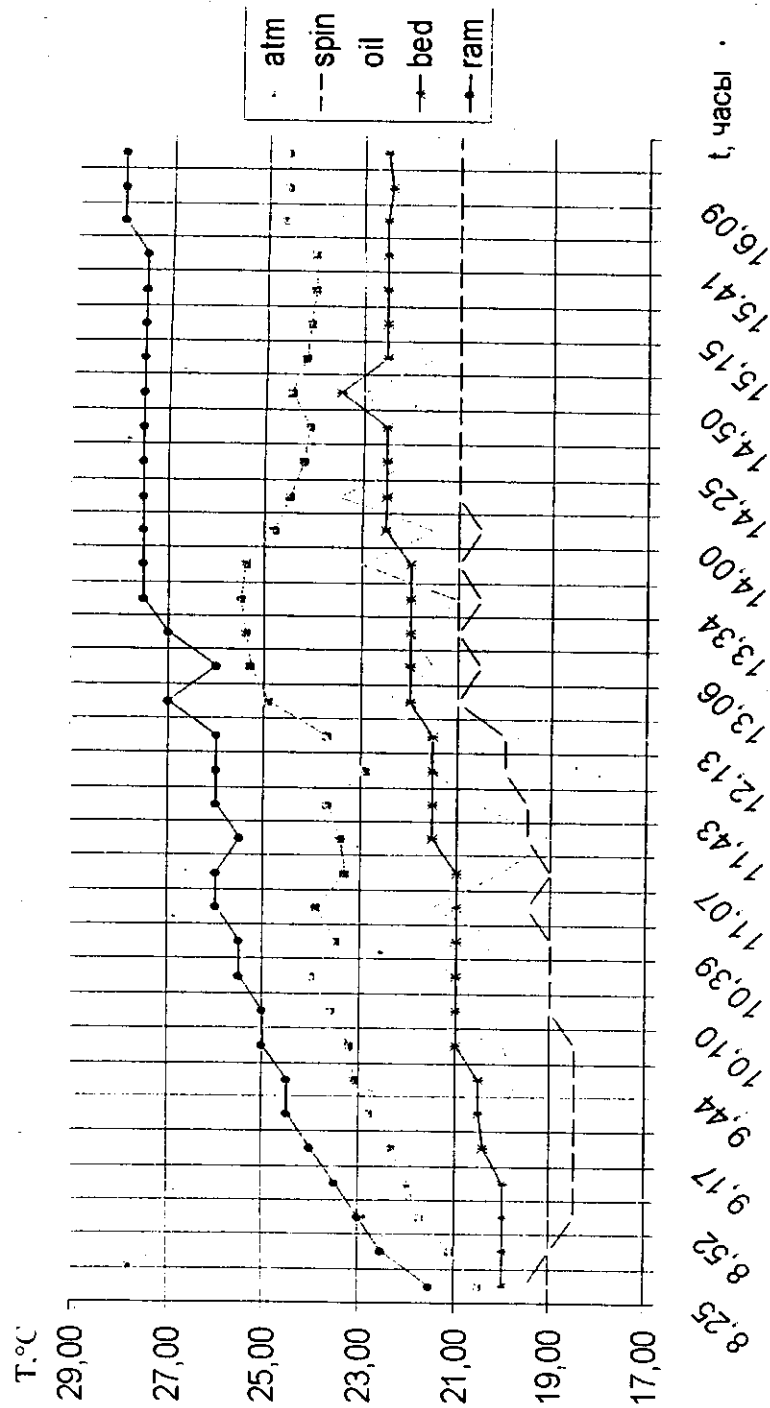


Рис. 17. Волнообразная погрешность уменьшена до 0.4 мкм



atm - температура воздуха над обрабатываемой деталью
 spin - температура шпиндельной головки
 ram - температура несущей шпиндельной колонны (у масляного коллектора)
 oil - температура хладагента на выходе холодильника
 bed - температура станины станка

Рис. 18

Чтобы уменьшить медленную компоненту погрешности в виде уклона, связанную с температурными деформациями элементов станка, вызванными изменениями температуры в помещении, справа и слева от станка были установлены кондиционеры. Были проанализированы различные режимы охлаждения левого и правого кондиционеров и на основе этих данных осуществлена попытка подбора оптимального режима работы кондиционеров, уменьшающего погрешности измерений и обработки. Такой режим не был обнаружен, и только тщательный выбор режима работы левого кондиционера при динамическом ручном управлении правым кондиционером позволил стабилизировать температуру воздуха над станиной станка в месте установки обрабатываемого электрода в диапазоне 0.25°C. На основе полученного опыта ручного управления работой правого кондиционера было решено оснастить его средствами автоматического управления. Наряду с этим была улучшена теплоизоляция помещения с целью уменьшения его связи с температурными колебаниями окружающего воздуха в пехе, доработана система конвекции и забора воздуха в помещении станка; существенный вклад в стабилизацию температуры в области обработки электрода внесла установка шторок по периметру защитного ограждения вокруг колонны, несущей шпиндельный узел станка. Существенный вклад в улучшение чистоты и точности обработки внесла установка системы подачи охлаждающей жидкости (спирта) в зону резания в распыленном виде.

Осуществленные мероприятия позволили вести измерения с точностью 1.5мкм в течение 10 мин.

Точность обработки стыковочных поверхностей длиной 1500мм к настоящему времени составляет 2.5мкм по координате Z и 4мкм по координате Y.

В табл. 2 сведены результаты усилий по усовершенствованию станка для режима измерений.

Таблица 2

| Погрешности | Погрешности в исходном состоянии станка, мкм | | Погрешности при измененном состоянии станка, мкм | | Изменения |
|-------------------------------------|--|------|--|-----|---|
| | Z | Y | Z | Y | |
| Оси | | | | | Параметры: 4210.5 = 0 (было - 8) 4210.6 = 0 (было + 9) |
| Скачкообразная погрешность | 2.5 | 3.0 | 0.0 | 0.0 | Режим работы холодильного агрегата: |
| Волнообразная погрешность | 2.0 | 2.8 | 0.4 | 0.8 | - параметры: 4220.1 = 23 (было 17) 4220.2 = 23 (было 17) |
| Погрешность в виде уклона за 10 мин | 5.0 | 5.0 | 0.7 | 0.7 | - вентилятор включен постоянно - компрессор: включен 30 с, отключен 60 с |
| Суммарная погрешность за 10 мин | 9.5 | 10.8 | 1.1 | 1.5 | Кондиционеры: ручное регулирование для поддержания постоянной температуры воздуха над станиной станка 24.5 ± 0.25°C |

Выводы

Благодаря проведенным исследованиям качества обработки материалов с использованием алмазного инструмента, исследованиям по определению реальных характеристик узлов и систем станка на аппаратном и программном уровнях, исследованиям зависимости точности обработки деталей от стабильности температуры хладагента в системе охлаждения станка, стабильности температуры обрабатываемой детали и основных узлов станка, стабильности температуры в помещении, где размещен станок, оказалось возможным предложить и реализовать ряд конкретных мер по повышению точности обработки электродов ускоряющей структуры с ПОКФ. Внедрение найденных и опробованных решений позволило выйти на принципиально новый технологический уровень в обработке электродов, что открывает возможность детальной отработки технологии изделия, соответствующей серийному производству.

К настоящему времени погрешность измерений на станке HS-238 снижена с 10 до 1мкм, неплоскостность стыковочных поверхностей уменьшена с 10 до 2,5мкм по координате Z и до 4мкм по координате Y. Кроме этого, внедрение к настоящему времени еще не использованных решений, проведение ряда дополнительных исследований и доработка узлов станка по результатам этих исследований (возможно с дооснащением станка дополнительным оборудованием) позволит существенно повысить и точность измерений, и точность обработки изделия на станке HS-238.

Следует отметить, что в перспективе, при организации серийного производства изделия, имеет смысл приобретение станка, реализующего ультрапрецизионное резание, а также соответствующей измерительной машины и обеспечение эксплуатации этого оборудования в помещениях, имеющих надежную виброизоляцию и оснащенных средствами по поддержанию стабильных температурных условий.

Александр Александрович Будтов
Александр Владимирович Груздев
Андрей Анатольевич Ловыгин
Геннадий Васильевич Маринин
Валентин Иванович Пономаренко
Валерий Иванович Петров
Юрий Александрович Свиштунов

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ С ПОКФ НА ЧАСТОТЕ 433МГЦ

Редактор В.И. Гусева

Заказ № 174/75 Подписано в печать 16.01.2006 г.
Офсетная печать. Формат 60×90/16.
Уч.-изд. л. 0.6. Тираж 100 экз.
Индекс 3694.

Отпечатано в в ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»