

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов»  
(ФГБНУ ТИСНУМ)

УДК 531.7; 620.17.08  
ВГК ОКП 39 7290 7  
№ Госрегистрации 117101340071-8  
Инв. № 227

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБНУ ТИСНУМ,

к.ф.-м.н.

  
В.Д. Бланк

«29» декабря 2017 г.

М.П.



ОТЧЕТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

«Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях»  
по теме: «Обзор проблемы, разработка, изготовление и испытания элементов экспериментального образца iPoRTH»  
(промежуточный)  
Этап первый

Соглашение о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г.  
№ 14.577.21.0274

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»  
Приоритетное направление «Индустрия наносистем»




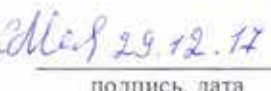

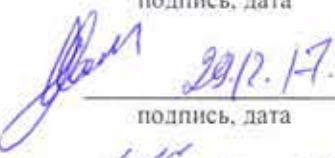


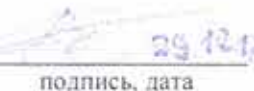
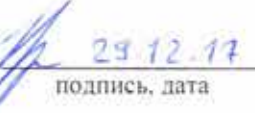
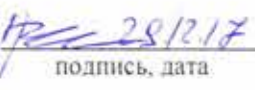
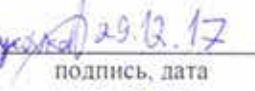


Часть 1



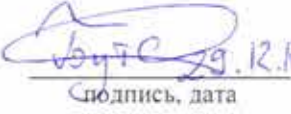
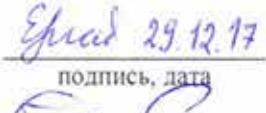




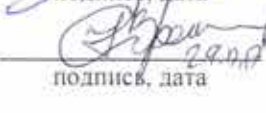

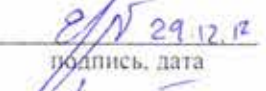



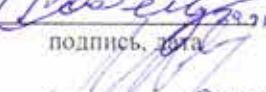
Руководитель работ,  
Заведующий отделом исследования  
физико-механических свойств  
ФГБНУ ТИСНУМ, к.ф.-м.н.

 / А.С. Усеинов

г. Москва, г. Троицк 2017 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы, Зав. отделом, канд. физ.-мат. наук	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	А.С. Усеинов (реферат, введение, заключение, разделы 1-4, 6-8, приложения А - Д)
Исполнители работы:		
Вед. науч. сотр., доктор физ.-мат. наук	 <u>15.11.17</u> подпись, дата	В.Н. Решетов (разделы 1-4, 6, 8, приложения А, Б, Г)
Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	И.И. Маслеников (разделы 1-4, 9, 11, приложения А, Б)
Науч. сотр.	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	С.Л. Мелекесова (разделы 3, 8, приложения Б, Г)
Вед. инженер	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	Э.В. Мелекесов (разделы 1, 3-4, 11)
Ст. науч. сотр., канд. техн. наук	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	В.В. Мещеряков (разделы 1, 3-4)
Науч. сотр.	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	В.Ф. Кулибаба (разделы 1, 3- 4)
Инженер	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	А.А. Берлизов (разделы 3-4, 11)
Науч. сотр., канд. техн. наук.	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	В.В. Соловьев (разделы 7-9, приложения В, Г, Д)
Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	К.С. Кравчук (разделы 3-4, 9, 11, приложения Г, Д)
Мл. науч. сотр.	 <u>28.12.17</u> подпись, дата	С.В. Прокудин (разделы 1, 3- 4)
Мл. науч. сотр.	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	А.А. Русаков (разделы 3-4, 11)
Мл. науч. сотр.	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	И.В. Красногоров (разделы 1, 3-4)
Ведущий инженер	 <u>29.12.17</u> подпись, дата	А.С. Карчиго (разделы 1, 3, 11)

Инженер 1 кат.	 подпись, дата	Н.В. Красногорова (разделы 1, 3-4)
Инженер	 подпись, дата	Е.В. Сумароко (раздел 1, 4, 11)
Стажер-исследователь	 подпись, дата	М.Д. Бутюто (раздел 1, 3, 11)
Стажер-исследователь	 подпись, дата	Е.В. Гладких (разделы 1-2, приложение А)
Нормоконтролер	 подпись, дата	Е.Е. Сапрыкин
Соисполнитель: ООО «РЭА-Т» (Раздел 12)		
Генеральный директор	 подпись, дата	С.Е. Федосеев
Технический директор	 подпись, дата	М.А. Галкин
Инженер	 подпись, дата	М.Н. Куклев
Нормоконтролер	 подпись, дата	Ю.В. Орешников
Соисполнитель: НИТУ «МИСИС» (разделы 5, 10)		
Доцент, к.т.н.	 подпись, дата	А.С. Быков
С.н.с., к.ф.-м.н.	 подпись, дата	Е.А. Выговская
Н.с.	 подпись, дата	О.В. Топорова
Доцент, к.ф.-м.н.	 подпись, дата	Д.А. Подгорный
Зав. лаб.	 подпись, дата	В.М. Панин
Доцент, к.ф.-м.н.	 подпись, дата	С.П. Кобелева
Доцент, к.ф.-м.н.	 подпись, дата	М.Д. Малинкович

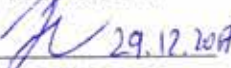
Индустриальный партнёр:

ОАО «Тяжпрессмаш»  
(разделы 13-18, приложения Е-Л)

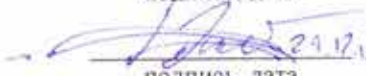
Зам. гл. инженера

  
29.12.17 В.В. Абрамян  
подпись, дата

Главный металлург

  
29.12.2017 С.М. Хориков  
подпись, дата

Зам. гл. металлурга

  
29.12.17 А.Ю. Дунаев  
подпись, дата

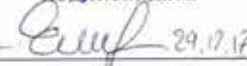
Начальник цеха №2

  
24.12.17 О.П. Агафонов  
подпись, дата

Зам. гл. инженера

  
29.12.2017 Н.П. Петров  
подпись, дата

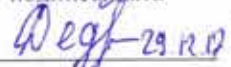
Главный энергетик

  
29.12.17 И.В. Кучер  
подпись, дата

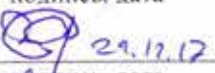
Начальник цеха №1

  
29.12.17 В.А. Трухачев  
подпись, дата

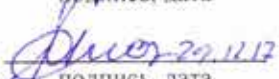
Инженер-конструктор КС

  
29.12.17 Е.И. Федотов  
подпись, дата


Начальник бюро КС

  
29.12.17 А.С. Мишин  
подпись, дата

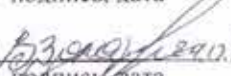
Главный сварщик

  
29.12.17 А.Ю. Головин  
подпись, дата


Начальник ГНСП

  
29.12.17 Т.А. Безрукова  
подпись, дата

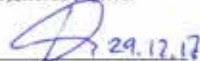
Начальник бюро ОГТ

  
29.12.17 В.И. Золотов  
подпись, дата

Инженер-конструктор КС

  
29.12.17 С.И. Клишова  
подпись, дата

Начальник бюро КС

  
29.12.17 А.И. Гудилин  
подпись, дата

Инженер-конструктор ОГМех

  
29.12.17 В.А. Русаков  
подпись, дата

## РЕФЕРАТ

Отчет 380 с., 177 рис., 17 табл., 10 прил., 2 части, 100 источников.

Ключевые слова: ТВЕРДОМЕР, ТВЕРДОСТЬ, МОДУЛЬ УПРУГОСТИ, ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ, ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ, ШЕРОХОВАТОСТЬ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ.

Объект прикладных исследований: экспериментальный образец портативного роботизированного твердомера, использующего принципы инструментального индентирования, и методики автоматизированного измерения механических свойств и характеристик высоты формы и шероховатости рельефа поверхности.

Цель ПНИЭР: обеспечение возможности оперативного роботизированного контроля рельефа поверхности, твердости, модуля упругости, предела текучести, коэффициента и показателя деформационного упрочнения широкого круга конструкционных материалов и функциональных покрытий при помощи портативного (вес измерительного блока до 15 кг) и автономного (время работы без подзарядки до 10 часов или 300 измерений) прибора, работающего в автоматическом режиме и позволяющего проводить измерения на крупногабаритных элементах узлов и агрегатов изделий и механизмов, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях, в том числе на габаритных заготовках, трубопроводах, элементах конструкции атомных и тепловых электростанций, а также функциональных металлических и композиционных гетерофазных конструкционных материалов нового поколения и деталей сложной формы, в том числе, полученных с использованием аддитивных технологий.

Результаты работ и их новизна. На данном этапе работ на основании аналитического обзора современной научно-технической, нормативной и методической литературы была проведена классификация приборов и методик измерения, позволяющих в автономном исполнении проводить измерения механических свойств объектов, а также характеристик рельефа

их поверхности. Показано, что существующие приборы имеют ряд серьезных ограничений, препятствующих их внедрение в широкую практику. С учетом выявленных недостатков были разработаны варианты возможных технических решений задачи создания экспериментального образца портативного роботизированного твердомера, использующего принципы инструментального индентирования (instrumented Portable Robotic Tester for Hardness, далее – «экспериментальный образец iPoRTH» или «iPoRTH»). На основании заявленных областей применения прибора, а именно машиностроительной и атомной отраслях, выбрано и обосновано наиболее перспективное и технологичное техническое решение для реализации экспериментального образца iPoRTH. Для измерения предела текучести, коэффициента и показателя деформационного упрочнения с применением сферических наконечников для создания необходимого усилия вдавливания предложено использовать моторизованные линейный актюатор. Для прецизионного измерения перемещений в этом режиме – дифференциальный парный емкостной датчик. Для режима измерения твердости и модуля упругости в режиме оперативного контроля предложено использовать электромагнитный актюатор для приложения силы и дифференциальный емкостной датчик для измерения перемещения индентора.

На основании расчета конструкции и аналитического и численного моделирования основных узлов разрабатываемого экспериментального образца iPoRTH оптимизировано соотношение трудоемкости изготовления и производительности прибора.

Разработан комплект ЭКД для изготовления макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH. Данный макет изготовлен и проведены его исследовательские испытания в соответствии с разработанной Программой и методиками.

Проведены экспериментальные исследования, по результатам которых выработаны рекомендации по набору измеряемых характеристик в

зависимости от способов обработки наиболее распространенных конструкционных материалов.

Проведены экспериментальные исследования, по результатам которых выбраны материалы для изготовления различных элементов конструкции экспериментального образца iPoRTH.

Разработана компоновка основных радиоэлектронных узлов экспериментального образца iPoRTH, построены модели электронной схемы управления измерительным модулем, вычислительного блока обработки данных, схемы электропитания и модуля беспроводной цифровой связи.

Принципиальная новизна результатов ПНИЭР обеспечивается отсутствием в настоящее время на рынке портативных приборов, позволяющих в автономном режиме выполняться измерения механических свойств по методу инструментального индентирования. Кроме того, новым является предложенный комплексный подход к характеристике в полевых условиях механических свойств по результатам вдавливания сферических и пирамидальных наконечников, в том числе с применением информации о контактом электрическом сопротивлении и данных оптической конфокальной микроскопии.

Область применения: контроль механических свойств крупных объектов в полевых условиях. Задача контроля механической прочности объектов в полевых условиях является особенно актуальной с точки зрения обеспечения надежности работы охлаждающих контуров АЭС и предотвращения техногенных катастроф на промышленных трубопроводах. Одним из основных факторов, ограничивающих время работы АЭС, является охрупчивание корпуса реактора и усталостное и коррозионное разрушение трубопроводов первого охлаждающего контура. Проведение регламентного контроля состояния объекта, принятие решения о продлении срока эксплуатации возможно только при неразрушающем контроле охлаждающих контуров. Данная задача решается за счет использования портативных

устройств, позволяющих проводить индентационные испытания подобных объектов.

Практическое внедрение результатов ПНИЭР предполагается вести через создание линейки новых контрольно-измерительных приборов. Разрабатываемый прибор, включая получаемые технические решения и методики, алгоритмы измерений и программное обеспечение, могут быть использованы компаниями, занятыми в области металлообработки и металлопроката, производителями автоматизированных производственных линий в области общего машиностроения, на трубопроводах, а также на объектах атомных и тепловых электростанций. Предложенные решения приведут к повышению производительности труда в отраслях общего машиностроения, а также к повышению уровня роботизации производства. Комплексный подход к характеристике механических свойств, реализуемый в разрабатываемом приборе, позволит существенно повысить точность и достоверность оценки ресурса материалов и конструкций, подверженных деградации и старению в процессе эксплуатации.

Не менее значимой является задача контроля механических свойств крупногабаритных бесшовных изделий, выпускаемых ОАО «Тяжпрессмаш», в том числе методом непрерывного центробежного литья. Оперативный контроль индентационной твердости и определение характера деформационного разрушения изделий, изготавливаемых методомковки и быстрого охлаждения, актуально для крайне широкого круга производственных процессов.

Значимость работы. Основное внимание при выполнении ПНИЭР направлено на проведение комплексной диагностики механических характеристик материалов как через измерение диаграммы напряжение – пластическая деформация, так и через измерение индентационной твердости с помощью заостренных инденторов. Использование такого подхода позволяет не только фиксировать изменения механических свойств, вызванные ионизирующим излучением и нейтронными потоками, но и



фиксировать факт усталостного разупрочнения материала, а также рост внутренних напряжений в элементах конструкций и трубопроводах высоко давления. Особенно актуальны такого рода измерения для изделий, полученных с использованием аддитивных технологий, поскольку внутренние напряжения и объемная структура таких изделий могут зависеть от режимов работы лазерного оборудования, алгоритма формирования детали и ее формы. Возможность локального измерения механических свойств конечных изделий позволяет не только оптимизировать технологию производства, но и внедрить систему автоматизированного контроля готовых изделий с использованием разрабатываемого роботизированного портативного измерительного оборудования.

Прогнозное предположение о развитии объекта. На следующем этапе работы будет разработан, изготовлен и испытан макет модуля оперативного контроля, будут спроектированы, изготовлены и испытаны элементы радиоэлектронного обеспечения. Будет разработано и испытано встроенное и пользовательское программное обеспечение экспериментального образца iPoRTH. Будут разрабатываться методика, реализующая автоматизированную процедуру измерения твердости и модуля упругости. Будет разрабатываться ЭКД на экспериментальный образец iPoRTH в целом.

Настоящий отчет состоит из двух частей: основной и приложений.

Информация о ходе выполнения ПНИЭР и основных результатах, полученных при выполнении проекта, размещена в Интернет на веб-сайте ФГБНУ ТИСНУМ по адресу <http://www.tisnum.ru/fcp.html>.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Аналитический обзор по теме «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях».....	17
1.1	Методы измерения механических свойств.....	17
1.1.1	Измерения твердости и модуля упругости методом инструментального индентирования.....	17
1.1.2	Построение диаграммы напряжение – пластическая деформация.....	21
1.1.3	Восстановления диаграммы напряжение – деформация с использованием метода конечных элементов.....	33
1.2	Приборы неразрушающего контроля диаграммы напряжение – пластическая деформация.....	35
1.3	Получение трехмерного изображения поверхности различными методами.....	36
2	Патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.....	51
3	Разработка вариантов возможных технических решений задачи создания экспериментального образца iPoRTH.....	52
4	Выбор и обоснование наиболее перспективного и технологичного технического решения для реализации экспериментального образца iPoRTH.....	65
5	Результаты расчета конструкции: аналитического и численного моделирования основных узлов разрабатываемого прибора.....	83
5.1	Расчет корпуса датчика силы индентационного измерительного модуля.....	86
5.2	Аналитический расчет датчиков силы.....	100

5.3	Расчет деформации нижней части внешнего корпуса индентационного измерительного модуля.....	105
5.4	Расчет датчика перемещения индентационного измерительного модуля .....	107
5.5	Расчет деформации системы крепления и позиционирования измерительных модулей.....	113
6	Разработка ЭКД для изготовления макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH .....	118
7	Изготовление макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH.....	120
8	Разработка Программы и методик исследовательских испытаний макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH .....	127
9	Исследовательские испытания индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH .....	128
9.1	Механические испытания ключевых элементов экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH .....	128
9.2	Определение поля механических деформаций методом корреляционной обработки оптических изображений.....	132
10	Проведение экспериментальных исследований с целью выработки рекомендаций по набору измеряемых характеристик в зависимости от способов обработки наиболее распространенных конструкционных материалов .....	137
11	Проведение экспериментальных исследований с целью обоснования и выбора материалов для изготовления элементов конструкции экспериментального образца iPoRTH.....	159
12	Разработка компоновки основных радиоэлектронных узлов и проведение моделирования электронной схемы управления измерительным	

модулем, вычислительного блока обработки данных, схемы электропитания и модуля беспроводной цифровой связи .....	173
12.1 Компоновка основных радиоэлектронных узлов.....	173
12.2 Электронная схема управления измерительным модулем. ....	183
12.3 Вычислительный блок. ....	197
12.4 Аналогово-цифровой преобразователь. ....	202
12.5 Схема электропитания. ....	209
12.6 Моделирование работы модуля беспроводной связи.....	214
13 Разработка ЭКД для изготовления макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH .....	220
14 Изготовление макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH.....	221
15 Разработка Программы и методик исследовательских испытаний макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца iPoRTH .....	225
16 Исследовательские испытания макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей.....	226
17 Модернизация стенда РМЦ-1000 для изготовления образцов крупногабаритных труб.....	231
18 Приобретение оборудования / комплектующих / материалов, необходимых для выполнения ПНИЭР .....	244
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	247
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	250
Часть 2 ПРИЛОЖЕНИЯ.....	258
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	259

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЭКД ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTH.....	285
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTH.....	314
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTH .....	318
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ И ПРОТОКОЛ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTH.....	330
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ЭКД НА МАКЕТ СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ iPoRTH.....	335
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ iPoRTH.....	353
ПРИЛОЖЕНИЕ И. ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ .....	357
ПРИЛОЖЕНИЕ К. АКТ И ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ.....	369
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. КОМПЛЕКТ КД НА МОДЕРНИЗАЦИЮ СТЕНДА РМЦ- 1000, АКТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ, АКТ МОДЕРНИЗАЦИИ СТЕНДА РМЦ-1000.....	374

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЭС – атомная электростанция

iPoRTH – портативный роботизированный твердомер, использующий принципы инструментального индентирования (instrumented Portable Robotic Tester for Hardness).

АСМ – атомно-силовой микроскоп

ПГ – план-график

ПНИЭР – прикладное научное исследование и экспериментальная разработка

АВІ – автоматизированное индентирование сферическим наконечником (Automated Ball Indentation),

ПО – программное обеспечение

ISO – International Organization for Standardization (Международная организация по стандартизации)

ASTM - American Society for Testing and Materials

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ПК – персональный компьютер

ОС – обратная связь

ЭКД – эскизная конструкторская документация

ТЗ – техническое задание

РИД (РНТД) — результаты интеллектуальной (научно-технической) деятельности, а именно: программы для электронных вычислительных машин, базы данных, изобретения, полезные модели, промышленные образцы, селекционные достижения, топологии интегральных микросхем, секреты производства (ноу-хау), исключительные права на которые сохраняются за университетом

ГР СИ – Государственный реестр средств измерений

## ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: ТВЕРДОМЕР, ТВЕРДОСТЬ, МОДУЛЬ УПРУГОСТИ, ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ, ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ, ШЕРОХОВАТОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ.

Данное прикладное научное исследование и экспериментальная разработка (ПНИЭР) проводится в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 14.577.21.0274 от 26.09.2017 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по лоту шифр «2017-14-579-0057-023». Тема работы: «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях».

Целями данного первого этапа ПНИЭР являлись: обзор проблемы, разработка, изготовление и испытания элементов экспериментального образца iPoRTH.

Задачами, поставленными и решенными на данном этапе, являлись разработка вариантов возможных технических решений создания экспериментального образца iPoRTH, выбор и обоснование наиболее технологичного из них; разработка ЭКД и изготовление макета индентационного измерительного модуля; проведение экспериментальных исследований с целью обоснования и выбора материалов для изготовления элементов конструкции экспериментального образца iPoRTH.

Роль данного отчетного этапа в выполнении проекта в целом заключается в формировании принципов, на которых будет в дальнейшем строиться разработка экспериментального образца iPoRTH.

Соисполнителем работ, ООО «РЭА-Т», проведены работы по разработке компоновки основных радиоэлектронных узлов и проведению

моделирования электронной схемы управления измерительным модулем, вычислительного блока обработки данных, схемы электропитания и модуля беспроводной цифровой связи.

Соисполнителем работ, НИТУ «МИСиС», проведены работы по расчету конструкции, включающему аналитическое и численное моделирование основных узлов разрабатываемого экспериментального образца iPoRTH; также проведены экспериментальные исследования с целью выработки рекомендаций по набору измеряемых характеристик в зависимости от способов обработки наиболее распространенных конструкционных материалов.

Индустриальным партнером, ОАО «Тяжпрессмаш», разработан, изготовлен и испытан макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH; также проведена модернизация стенда РМЦ-1000, необходимого для изготовления образцов крупногабаритных труб, предназначенных для испытания iPoRTH и отработки измерительных методик.



# 1 Аналитический обзор по теме «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях»

## 1.1 Методы измерения механических свойств

В качестве основной механической характеристики, определяющей свойства конструкционных материалов, используемых в машиностроительных и атомных отраслях, целесообразно указать зависимость напряжение – деформация. Естественно, что существует ряд других параметров, определяющих трещиностойкость, вязкость, усталостные и иные свойства образца, однако данные ПНИЭР направлены на создание оборудования, получающего именно зависимость напряжение-деформация или её производную величину – модуль упругости в совокупности с параметром, определяющим пластические свойства образца, – твердостью. Существует ряд приборов, позволяющих исследовать образцы вплоть до деформаций, приводящих к их полному разрушению, такие устройства не являются предметом данного обзора. Целью выполнения работы является создание устройств, позволяющих измерять механические свойства образца неразрушающими методами, подразумевающими анализ диаграммы нагрузка-внедрение наконечника в материал, что и обуславливает область дальнейшего обзора.

### 1.1.1 Измерения твердости и модуля упругости методом инструментального индентирования

Метод инструментального индентирования, подразумевающий измерение твердости и модуля упругости на основе диаграммы нагрузка – глубина индентирования, активно использовался в качестве основного метода работы нанотвердомеров [1]. В настоящее время существует как

международный, так и отечественный стандарты, регламентирующие данные измерения [2,3].

Схематичное изображение диаграммы нагрузка-внедрение, а также схематичное изображение контакта, поясняющее введенные обозначения, приведены на рисунке 1.

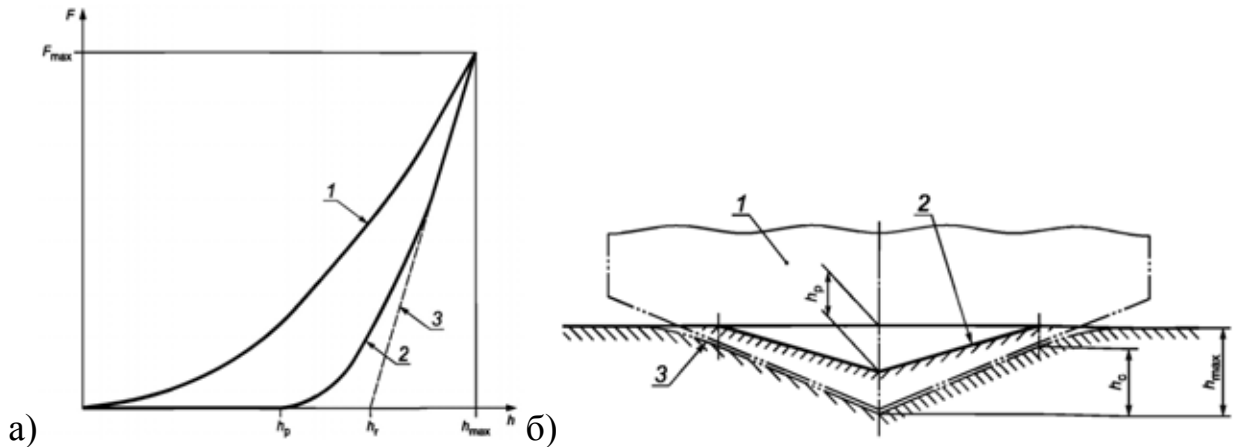


Рисунок 1 – а) схематичный вид диаграммы нагрузка – разгрузка [3] б) обозначения параметров контакта индентора с образцом [3]

Ключевыми величинами, измеряемыми на данной диаграмме, являются величина максимальной нагрузки  $F_{max}$ , максимальная глубина индентирования  $h_{max}$  и наклон разгрузочной кривой  $S$ . Дальнейшее вычисление сводится к следующим выражениям:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (1)$$

$$A_p = 24.5h_c^2 \quad (2)$$

$$h_c = h_{max} - \varepsilon F_{max}/S \quad (3)$$

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_p}} \quad (4)$$

$$\frac{1-v_s^2}{E_{IT}} + \frac{1-v_i^2}{E_i} = \frac{1}{E_r} \quad (5)$$

Параметр  $\varepsilon$  меняет свое значение в зависимости от типа используемого наконечника, для индентора в форме пирамиды Берковича он равен 0.75. Символами  $v_s$  и  $v_i$  обозначены коэффициенты Пуассона образца

и индентора;  $E_{IT}$  – измеренное значение модуля упругости,  $E_r$  – приведенный модуль упругости в области индентирования,  $E_i$  – модуль упругости наконечника. Следует отметить, что из указанных уравнений можно исключить контактную площадь, если модуль материала известен. В этом случае для вычисления твердости требуется только информация о приложенной силе и контактной жесткости, которая может быть определена из сдвига частоты резонансных колебаний измерительного блока при контакте индентора с поверхностью. На таком подходе основана работа ультразвуковых твердомеров (UCI testers), а также метод картографирования твердости, описанный в работе [4].

Твердость и модуль упругости являются основными величинами, определяемыми при помощи метода инструментального индентирования, однако метод позволяет получить и другие величины: ползучесть, релаксацию, пластическую и упругую составляющие работы деформации.

Как видно из представленных выше уравнений, две из трех величин, определяемых из экспериментальной данных, измеряются на кривой нагружения. Если же добавить информацию о контактной жесткости при нескольких значениях глубины во время нагружения, то станет возможным получить твердость и модуль упругости в зависимости от глубины. Одним из методов, использующих данный подход, является индентирование с частичной разгрузкой [5,6]. В рамках данного подхода производится индентирование до некоторой заданной нагрузки, а затем производится частичная разгрузка: до некоторой доли от предыдущего пикового значения силы. Полученных данных в ходе каждого цикла достаточно для вычисления твердости и модуля упругости. В рамках следующего цикла нагружение до предыдущего значения нагрузки идет вдоль полученной ранее разгрузочной кривой, а затем продолжает прерванный ранее цикл нагрузки. Каждый последующий цикл позволяет получить значения твердости и модуля упругости для соответствующего значения нагрузки (или глубины). Пример зависимости профиля силы от времени а также зависимость силы от глубины

приведены на рисунке 2. Таким образом, метод позволяет получить зависимость механических свойств от глубины.

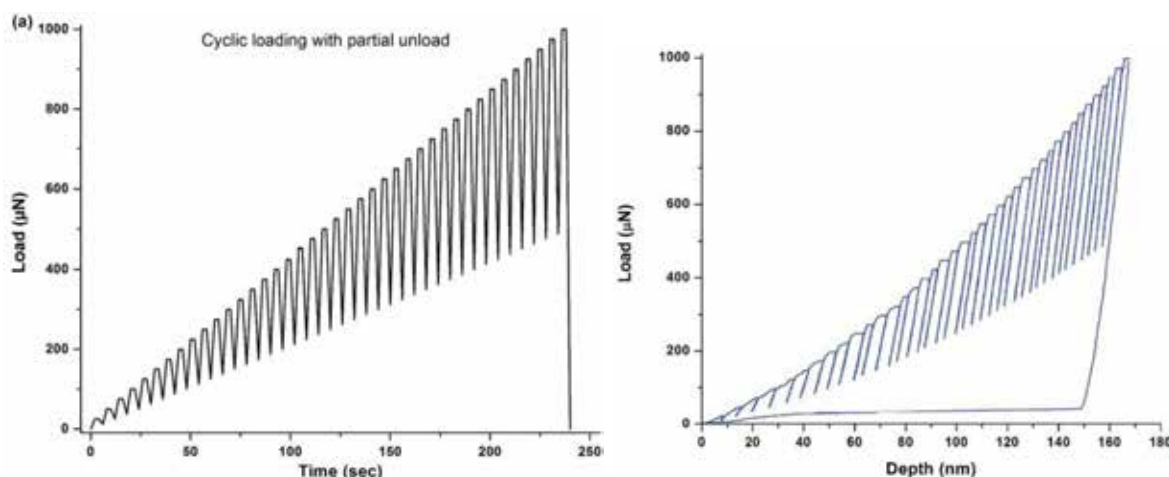


Рисунок 2 – Зависимость нагрузки от времени (а) и нагрузки от углубления при индентировании с частичной разгрузкой [7]

Другой подход, позволяющий вычислять значения твердости и модуля упругости в зависимости от глубины практически как непрерывные функции, реализуется в методах динамического анализа (различные производители используют различные названия: CSM, DMA [8–10]).

В основе данного метода лежит подход, в рамках которого в дополнение к линейной развертке по глубине или силе добавляется синусоидальная составляющая, которая по сути реализует многократную частичную разгрузку, так что кривая зависимости силы от глубины качественно является похожей на рисунке 2б, однако обычно содержит гораздо больше нагрузочно-разгрузочных циклов.

Если представить зависимость силы и глубины в виде:

$$F = F_{qs}(t) + F_0 \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$h = h_{qs}(t) + h_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

где функции с индексами  $qs$  являются квазистатическими, то следуя, например, материалам [10], пренебрегая массовыми силами и рассматривая силу, приложенную к образцу, упрощенные выражения для жесткости можно представить в виде:

$$S_{contact}' = \frac{F_0}{h_0} \cos \varphi \quad (8)$$

$$S_{contact}'' = \frac{F_0}{h_0} \sin \varphi. \quad (9)$$

Единичный штрих соответствует действительной части жесткости контакта, двойной штрих соответствует мнимой части данной величины. Соответствующие выражения для модуля упругости и модуля потерь имеют аналогичный выражению (4) вид:

$$E' = \frac{S'}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_p}} \quad (10)$$

$$E'' = \frac{S''}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_p}} \quad (11)$$

Выражения (10), (11) можно использовать для вычисления модуля упругости и модуля потерь материала. Пример измерения модуля упругости и модуля потерь, в том числе в зависимости от частоты или от пространственных координат (картографирование), можно найти, например, в работах [11,12].

### 1.1.2 Построение диаграммы напряжение – пластическая деформация

Основные уравнения, позволяющие получить связь пластического напряжения  $\sigma_T$  и соответствующей ему пластической деформации  $\varepsilon_T$ , можно представить в виде [13]:

$$\varepsilon_T = \xi \tan(\theta) \quad (12)$$

$$\sigma_T = \frac{F_{max}}{\psi A_c}. \quad (13)$$

В дополнение к уже введённым параметрам максимальной нагрузки  $F_{max}$  и контактной площади  $A_c$  здесь вводится параметр  $\theta$ , обозначающий половину контактного угла (рисунок 3), Кроме того, в уравнении

дополнительно появляются два численных параметра  $\xi$  и  $\psi$ , которые в общем случае зависят от формы индентора и свойств материала.

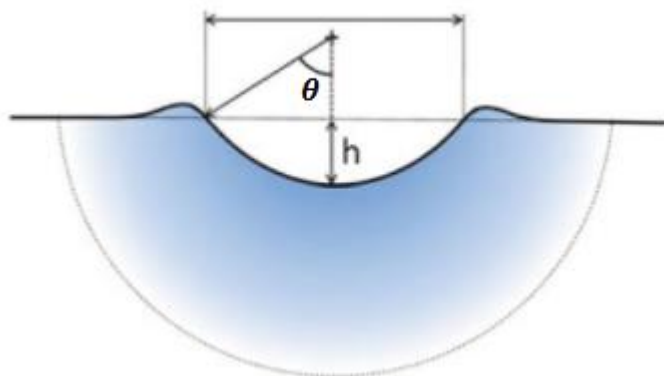


Рисунок 3 – Половинный угол контакта сферического индента [14]

В рамках такого общего определения параметров  $\xi$  и  $\psi$ , как для материала совершенно неопределенных функций, уравнения (12) и (13) не имели бы смысла, поэтому здесь стоит отметить некоторые типичные значения данных параметров. Для индентирования сферическим телом уравнение (12) было предложено еще в середине 20-го века Табором [15], который на основе экспериментальных данных получил соотношение:

$$\varepsilon = 0.2d/D, \quad (14)$$

где  $d$  – диаметр остаточного отпечатка, а  $D$  – диаметр индентирующей сферы. Данное уравнение с коэффициентом  $\xi = 0.2$  стало широко употребительным и зачастую использовалось для получения диаграммы напряжение-пластическая деформация [16–18], хотя конечно здесь следует сделать оговорку, что при вычислении диаметра  $d$  пренебрегают навалами вокруг индента (pile-up), а также противоположным эффектом (sink-in). Таким образом, сферическое индентирование позволяет получить диаграмму напряжение-деформация при сжатии до 20 %, что соответствует внедрению сферы на глубину, равную ее радиусу. Здесь следует указать, что в соответствии с работами Табора, данная эквивалентная пластическая деформация достигается на краю контактной области, и непосредственно под индентором деформация существенно больше 0.2 (рисунок 4 [19]); выбор

другой репрезентативной точки позволяет строить кривые до больших значений пластической деформации, используя метод конечных элементов [19,20].

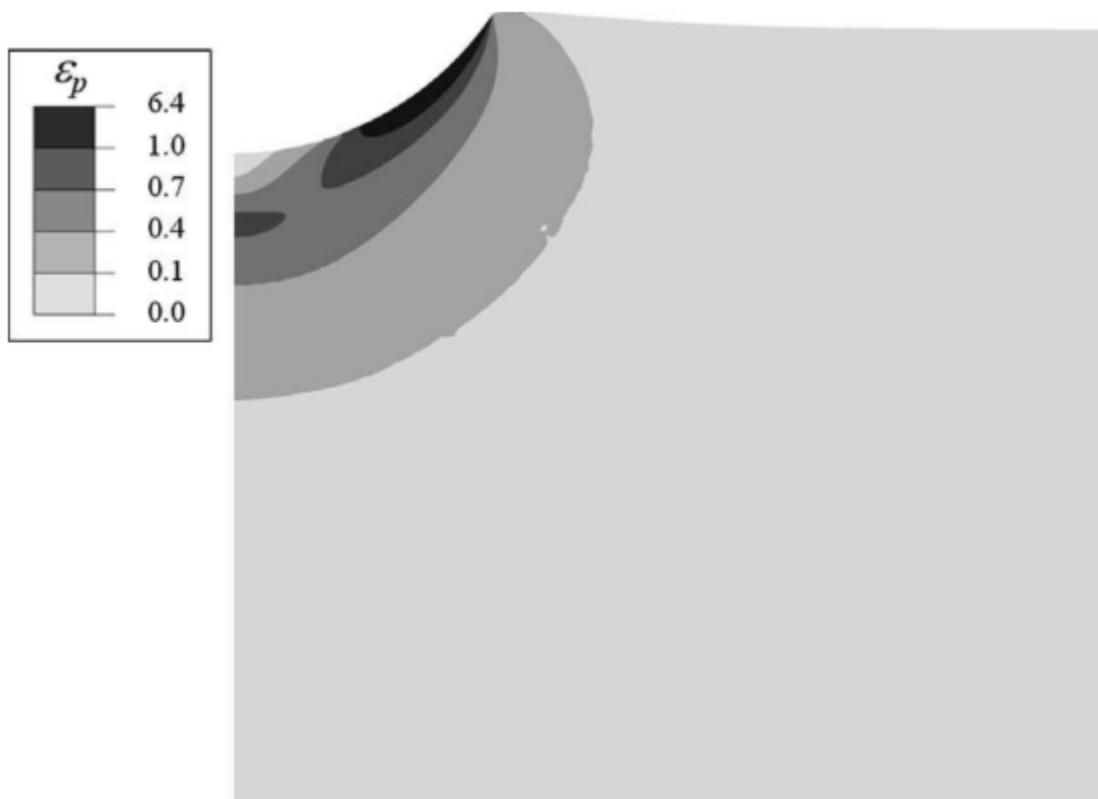


Рисунок 4 – Распределение пластических деформаций в нагруженном состоянии [19]

Второе уравнение системы, образованной уравнениями (12) и (13), фактически устанавливает факт того, что напряжение  $\sigma_T$  меньше среднего давления  $\frac{F_{max}}{A_c}$  или, по сути, меньше твердости материала в  $\psi$  раз. Для развитой пластической деформации этот коэффициент составляет  $\psi \approx 3$ . Данное соотношение было известно достаточно давно и описано, по крайней мере, в работе А.Ю.Ишлинского, опубликованной в сороковых годах двадцатого века.

Среди существующих в настоящее время методов, предлагающих аналитические соотношения для измерения свойств материала при помощи уравнений (12) и (13) можно выделить метод АВІ (Automated Ball Indentation), предложенный Haggag [21–23]. Данный метод используется в настоящее время [24–27], одной из типичных областей применения является

контроль деградирующих от излучения элементов атомных электростанций, труб охлаждающего контура [24].

### 1.1.2.1 Метод АВИ

Уравнения метода АВИ можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_p = 0.2 \frac{d_p}{D} \quad (15)$$

$$\sigma_t = \frac{4P}{\pi d_p \psi} \quad (16)$$

$$\psi = \begin{cases} 1.12, & \Phi \leq 1 \\ 1.12 + \tau \cdot \ln \Phi, & 1 < \Phi \leq 27 \\ 2.87 \alpha_m, & \Phi > 27 \end{cases} \quad (17)$$

$$\Phi = \frac{\varepsilon_p E_2}{0.43 \sigma_t} \quad (18)$$

$$\tau = \frac{2.87 \alpha_m - 1.12}{\ln(27)} \quad (19)$$

$$d_p = \left( 0.5 C D \frac{h_p^2 + \left(\frac{d_p}{2}\right)^2}{h_p^2 + \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 - h_p D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$C = 5.47 P \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right). \quad (21)$$

Параметр  $\alpha_m$  определяет зависимость сопротивления материала от скорости деформации; в отсутствии дополнительной информации его полагают равным единице. Символами  $h_p$  и  $d_p$  обозначены глубина и диаметр остаточного пластического отпечатка,  $D$  – диаметр индентирующего тела,  $P$  – максимальная нагрузка,  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости индентирующего тела и образца.

Уравнения (15), (16) по сути совпадают с уравнениями (12) и (13), уравнение (17) задает закон изменения сдерживающего фактора  $\psi$  (constraint factor) при переходе от упругой деформации к пластической, причем степень



развития этой деформации характеризуется параметром  $\Phi$ , подобную логарифмическую аппроксимацию, сделанную на основе анализа экспериментальных данных, можно найти в работе [28].

Уравнение (20) вместе с множителем  $C$ , определенным уравнением (21), выводится из уравнения Герца, связывающего нагрузку при упругой деформации двух тел, имеющих форму параболоида вращения, или, в предельном случае, параболоида вращения и упругого полупространства. Данное соотношение часто употребляют для описания взаимодействия тел сферической формы, так как параболоид вращения вблизи своего максимума является аппроксимацией сферы. Вывод соотношения (20) использует подход работы Табора [15], который в силу обратимости упругой деформации при разгрузке, рассмотрел контакт с пластически деформированной поверхностью в рамках контакта индентирующего тела радиусом  $r_1$  и полости отрицательного радиуса  $r_2$ . После разгрузки геометрия поверхности имеет форму, представленную на рисунке 5.

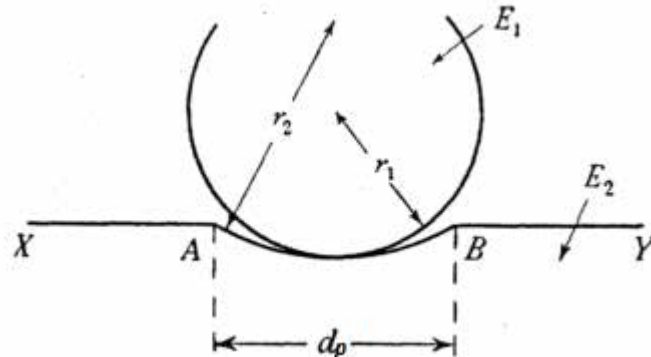


Рисунок 5 – Индентирующее тело и профиль поверхности после разгрузки [19]

Исходя из предположения, что коэффициенты Пуассона для обоих тел равны 0.3, из модели Герца следует, что в момент максимальной нагрузки имеет место:

$$d_p = 2.22 \left( \frac{F}{2} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right)^{1/3} . \quad (22)$$

Данное соотношение предполагает, что контактный диаметр в момент максимальной нагрузки и диаметр остаточного отпечатка совпадают, т.е. в рамках представленного подхода, при нагружении индентора в уже существующий отпечаток до предыдущего значения максимальной силы данный диаметр не меняется, что принято считать верным с точностью до нескольких процентов. Важным замечанием, является то, что соотношение (22) остается в достаточной степени верным в случае наличия навалов.

Переход от уравнения (22) к уравнению (20) связан с геометрическим пересчетом радиуса  $r_2$  через хорду  $d_p$  и высоту сегмента  $h_p$ . Игнорирование наличия навалов (pile-up) и провалов (sink-in), что в некоторой степени аналогично подходу Оливера-Фара для инструментального индентирования, происходит в момент расчета глубины  $h_p$ . Как следует из рисунка 6а и 6б,  $h_p$  отсчитывается от уровня начальной поверхности, в то время как при наличии навалов уровень поверхности вокруг несколько подымается и в действительности контактный диаметр  $d$  несколько больше  $d_t$  в случае навалов, или же меньше  $d_t$  в случае провалов (рисунок 6в).

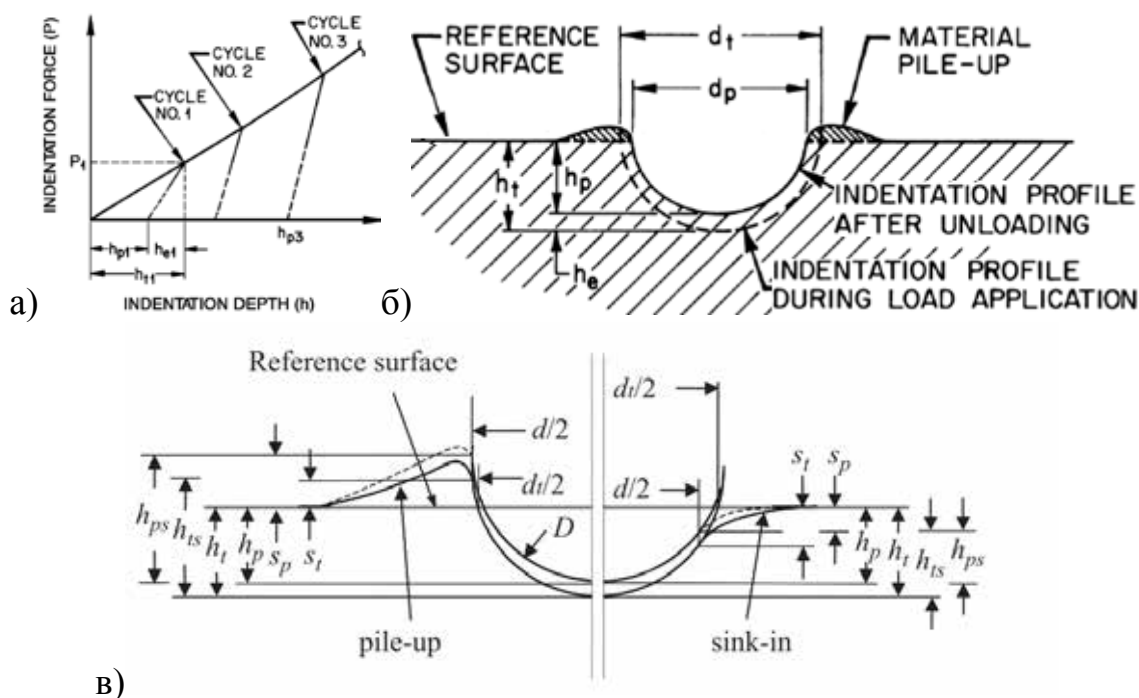


Рисунок 6 – Обозначения, используемые в методе АВИ: а) – диаграмма нагружение-деформация [23], б) – обозначение базовых величин согласно

[23], в) – схема, объясняющая различие контактных диаметров при наличии навалов или провалов [20]

Таким образом, метод АВІ, выраженный уравнениями (16)-(21) не учитывает навалов, однако даёт самосогласованную систему аналитических зависимостей, позволяющих получить важный эмпирический результат.

Отдельное внимание метод АВІ уделяет определению предела текучести, которое осложнено наличием нестабильности пластического течения в виде деформаций Людерса [22] (в русскоязычной литературе используется сочетание Чернова-Людерса [29]). В работе [30] указывается о связи деформации Людерса  $\varepsilon_L$  с коэффициентом и показателями упрочнения  $K$  и  $n$  в виде соотношения Морриса [31]:

$$\ln \frac{K}{\sigma_{ly}} = \varepsilon_L - n \ln \varepsilon_L. \quad (23)$$

Интересно, что данное соотношение практически не обсуждалось в литературе, а оригинальную работу, опубликованную в указанных выше трудах конференции, достаточно сложно или невозможно найти в электронном виде. Таким образом, данное соотношение вызывает достаточно много недоверия, однако в патенте [23], и других описаниях метода АВІ оно используется; под символом  $\sigma_{ly}$  понимается предел текучести  $\sigma_y$ .

В связи с указанным выше обстоятельством о деформациях Людерса, предел текучести согласно методу АВІ принципиально находится не из аппроксимации точек напряжение-пластическая деформация согласно закону Холломоуна (Hollomon law [37]), а при помощи следующих вычислений. Строится зависимость:

$$\frac{F}{d_t^2} = A \left( \frac{d_t}{D} \right)^{m-2} \quad (24)$$

Параметры  $A$  и  $m$  следует определить как коэффициенты, обеспечивающие наилучшую аппроксимацию зависимостью (24) точек, получаемых при подстановке в данную зависимость экспериментальных значений силы  $F$  и

диаметра  $d_t$ . Диаметр в соответствии с рисунком 4 вычисляется согласно зависимости:

$$d_t = 2\sqrt{h_t D - h_t^2} \quad (25)$$

Параметр  $A$ , полученный из соотношения (24), используется для определения предела текучести  $\sigma_y$  согласно (см. [32]):

$$\sigma_y = \beta \cdot A + B \quad (26)$$

Параметр  $B$  может быть подобран в качестве корректировочного для определенного класса металлов, для неизвестного материала согласно проекту стандарта АВІ [33] (рассматривался комитетом E28 американского агентства по стандартизации ASTM [34], однако на сегодня АВІ является только стандартом компании АТС) данный параметр следует выбрать равным нулю.

#### 1.1.2.2 Эмпирические соотношения, используемые в приборах Frontics

Известно [35], что для описания навалов используют коэффициент  $c$ , определенный соотношением

$$c^2 = \frac{a^2}{D h_t} \quad (27)$$

Эквивалентным определением данного параметра могут быть равенства [20]:

$$c^2 = \frac{h_{ps}}{h_p} \cong \frac{h_{ts}}{h_t} \cong \frac{d^2}{d_t^2} \quad (28)$$

В работе [36] учет навалов предлагалось проводить на основе соотношения, предложенного в работе [35],

$$c^2 = \frac{5(2n-1)}{2(4n+1)^2} \quad (29)$$

которое, впрочем, согласно замечанию [20] заведомо содержит ошибку, так как основано на деформационной теории пластичности. Соответственно, в рамках подхода данной работы [36] «истинную» глубину  $h_c$  предлагается учитывать из соотношений:

$$h_c = h_c^* + h_{p/s} \quad (30)$$

$$h_c^* = h_{max} - 0.75F_{max}/S, \quad (31)$$

где  $h_c^*$  - глубина без учета навалов, вычисленная на основе упругой модели, т.е. определенная так же как и при инструментальном индентировании, описанном ранее (см. уравнение (3)). Учитывая определение параметра  $c$  (для обозначения  $a^*$  - радиус контакта без учета навалов из соотношения (27) следует  $c = \frac{a^2}{a^{*2}}$ ) радиус контакта с учетом навалов можно записать в виде:

$$a^2 = \frac{5(2-n)}{2(4+n)} (2Rh_c^* - h_c^{*2}). \quad (32)$$

Используя данное уравнение, в работе [36] предлагается определять показатель  $n$  как самосогласованное решение, полученное в результате итерационной процедуры: задается начальное значение  $n$  ( $=0.3$ ), производится расчет контактного радиуса (уравнение (32)), на основе данного значения определяют значения напряжений и пластических деформаций, полученные точки аппроксимируют в соответствии с законом Холломоуна (Hollomon law [37]). Если показатель упрочнения из закона Холломоуна совпадает с показателем упрочнения, введенным для расчета контактного радиуса, то расчет прекращают. Схематичное изображение последовательности необходимых действий приведено в патенте [38] (рисунок 7), построенном на основе изложенного в статье [36] подхода.

Интересно, что в рамках патента [38] отношение  $a^2/(2Rh_c^* - h_c^{*2})$  являющееся функцией показателя упрочнения  $f(n)$  задается не в виде дроби, указанной в формуле (32), а виде зависимости

$$f(n) = -0.3555n + 1.1108, \quad (33)$$

определенной для сталей марок AISI1025, SA106, SA213, SA508, SM50, ТМСП, причем можно отметить, что данная зависимость не обязана быть линейной и может иметь другой вид для иных материалов.

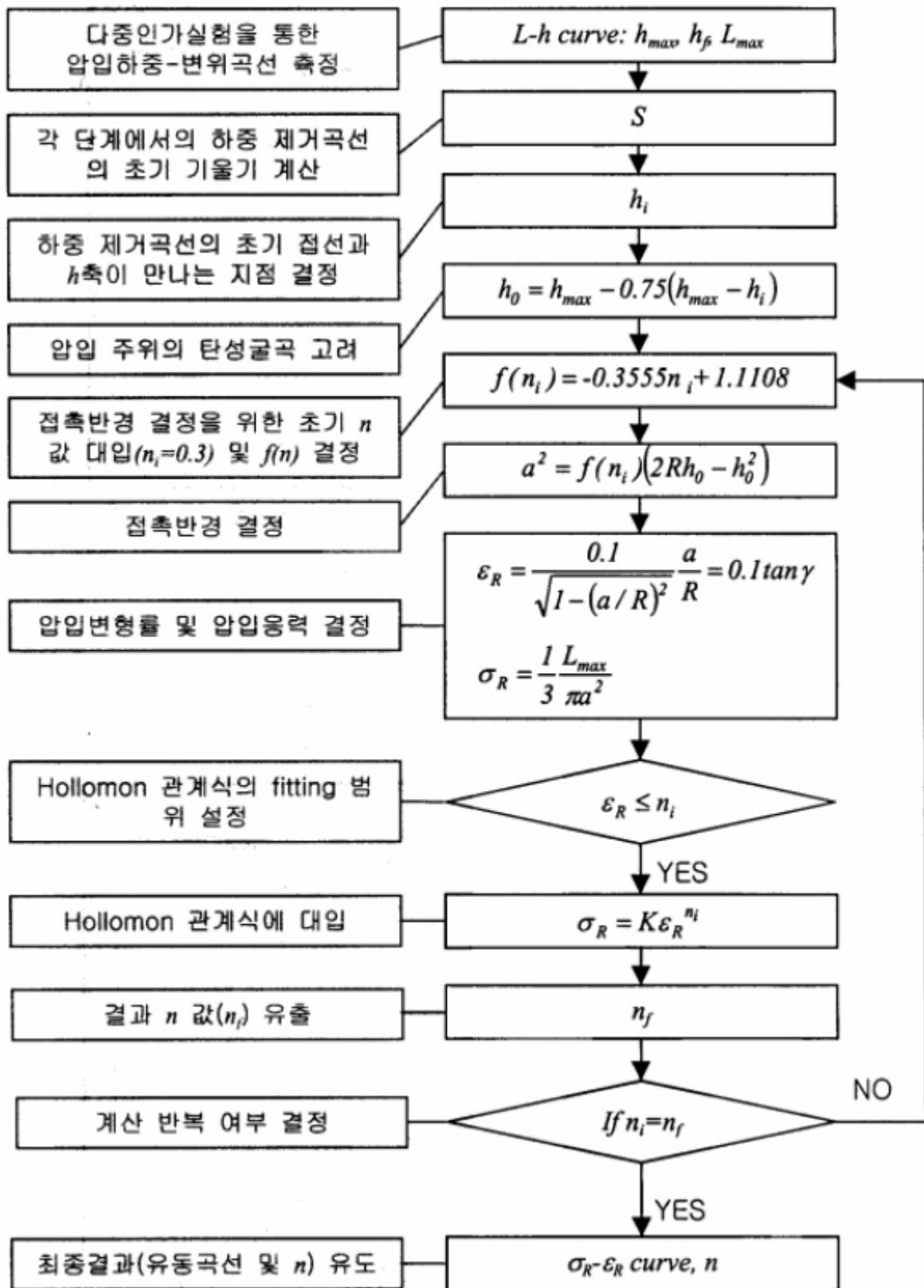


Рисунок 7 – Схема итерационного расчета согласно [38]

Следует отметить, что в работе [36] было предложено несколько вариантов оценки достигнутого уровня деформации:

$$\varepsilon_r = 0.2 \sin \gamma \quad (34)$$

$$\varepsilon_r = 0.4 h_c/a \quad (35)$$

$$\varepsilon_r = \log\left(\frac{2}{1+\cos(\gamma)}\right) \quad (36)$$

$$\varepsilon_r = 0.1 \tan \gamma. \quad (37)$$

Было отмечено, что именно последний вариант является лучшим для материалов с упрочнением, этот же вариант используется в патенте [38]. Можно отметить, что величина  $\tan \gamma$  также может быть определена как  $1/\sqrt{1 - (a/R)^2}$ . Для расчета напряжений коэффициент  $\psi$  в уравнении (13) был равен трем.

В работе [39] был промоделирован ряд материалов, и было обнаружено, что коэффициент  $c$  (формулы (27), (28)) зависит не только от  $n$ , но и при заданном  $n$  является функцией параметра  $4 \frac{E}{\sigma_y} \frac{h}{d_t}$ . Можно сказать, что результатом данной работы был сам факт зависимости навалов от данного параметра без определенных перспектив практической корректировки или учета данного явления.

В работе [40] была предложена конкретная аналитическая зависимость, позволяющая учитывать навалы как функцию  $n$  и  $h_{max}/R$ , влияние провалов качественно связывалось с параметром  $\sigma_y/E$ , однако было отмечено, что даже без связи с данным параметром при  $n=0.2$  «упругое» уравнение (3), а точнее слагаемое  $0.75 F_{max}/S$  дает ошибку не более 5%. Приведенная величина навалов  $h_{pile}^*$  аппроксимировалась зависимостью:

$$\frac{h_{pile}^*}{h_c^*} = 0.131(1 - 3.423n + 0.079n^2) \left(1 + 6.258 \frac{h_{max}}{R} - 8.072c_2 \left(\frac{h_{max}}{R}\right)^2\right), \quad (38)$$



величина  $h_c^*$  определялась уравнением (31). Диапазон рассмотренных значений  $\sigma_y/E$  составлял от 0.001 до 0.004, диапазон значений  $n$  составил от 0.05 до 0.5. Представленный в работе [40] подход был изложен в техническом отчете [13]. Зависимость (38) вошла в патентную формулу одного из патентов Frontics [41].

### 1.1.3 Восстановления диаграммы напряжение – деформация с использованием метода конечных элементов

В рамках предыдущего раздела уже была приведена информация о работе, в которых метод конечных элементов был использован для получения эмпирического соотношения, позволяющего в совокупности с известными ранее аналитическими соотношениями строить диаграмму напряжение – деформация на основе экспериментальных данных. С другой стороны, получение искомой зависимости  $\sigma - \varepsilon$  можно вести на основе прямого сравнения кривой приложенная сила-углубление ( $F - h$ ) с данными конечного моделирования.

Одним из основных вопросов в данной области является вопрос единственности восстановления кривой  $\sigma - \varepsilon$  для заданной зависимости сила-углубление. В работе [42] было показано, что для пирамидального и конического индентора различные свойства материала могут приводить к одной и той же кривой  $F - h$  (Рисунок 8). Пример алгоритма, позволяющего получить уникальный набор параметров  $E$ ,  $\sigma_{0.033}$  и  $\sigma_y$  вплоть до значений  $\sigma_y/E \sim 0.033$  приведен в работе [43].

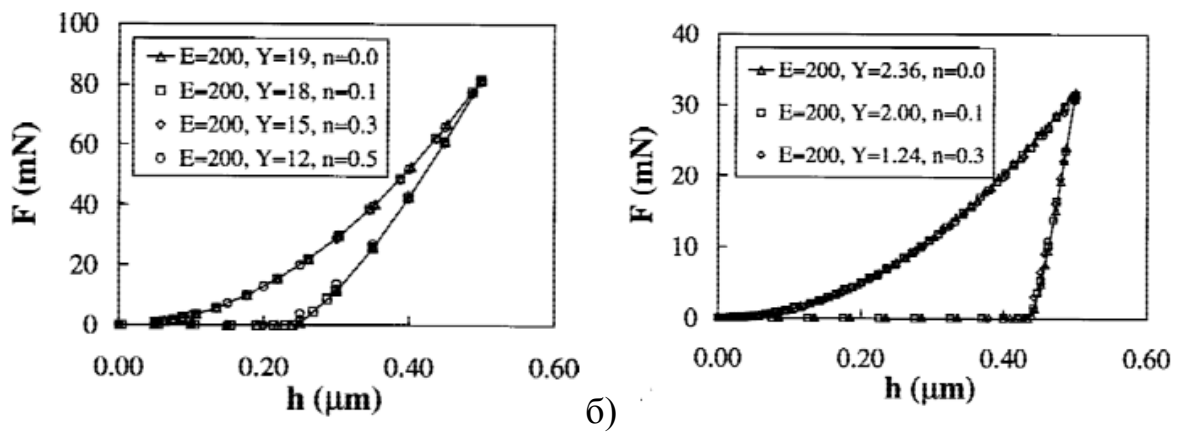


Рисунок 8 – Кривые нагружения для высокоупругих (а) и высокопластичных (б) материалов [42]

В случае индентирования сферическим наконечником ситуация несколько отличается: при индентировании вплоть до  $h_{max}/D \sim 6\%$  кривые  $F - h$  для различных кривых  $\sigma - \varepsilon$  могут быть практически неразличимы, однако при больших деформациях, различие все-таки становится заметным [19] (рисунок 9).

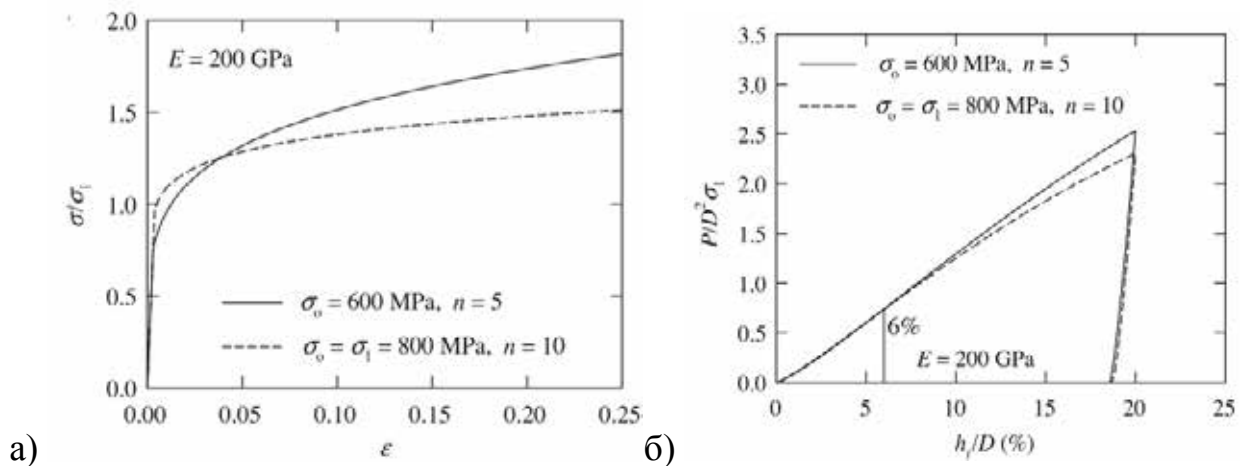


Рисунок 9 – Кривые напряжение-деформация (а) и нагрузка-углубление для различных материалов [19]

Можно отметить, что прямой расчет методом конечных элементов не является оптимальным для работы разрабатываемого прибора, особенно в полевых условиях, так требует значительных вычислений и, возможно, последующей оценки адекватности полученного решения.

## 1.2 Приборы неразрушающего контроля диаграммы напряжение – пластическая деформация.

В настоящее время можно выделить два основных производителя приборов, производящих неразрушающий контроль диаграммы сигма-эпсилон: Advanced Technology Corporation (ATC) и Frontics. Исторически, на рынке компания ATC появилась ранее Frontics'a, ее президент F.Haggag является основателем метода АВІ, положенного в основу функционирования данных приборов. Основным устройством, позволяющих измерять упомянутую выше диаграмму является прибор SSM-M1000

Приложение нагрузки осуществляется гидравлическим способом, нагрузка измеряется при помощи силовой ячейки, перемещение – при помощи линейного дифференциального трансформатора (LVDT). В целом, компания предлагает одну и ту же конструкцию прибора в течение долгих лет, программное обеспечение выглядит также устаревшим. Вместе с тем, можно отметить, что почти за несколько десятилетий метод АВІ стал общепринятым методом контроля состояния трубопроводов на атомных электростанциях [24–27,33,44,45].

Гораздо более новой и в то же время более интенсивно развивающейся компания является компания Frontics [46]. В линейке продуктов данной компании в числе прочего присутствует ряд приборов, позволяющих измерять диаграмму напряжение-деформация с нагрузками от 2 кгс до 300 кгс. Приборы Hybrid Micro-AIS [47], обладающие максимальной нагрузкой 2 кгс дополнительно содержат модуль электрополировки, приборы AIS3000 compact и AIS3000 HD обладают нагрузками до 100 кгс и 120 кгс соответственно и позволяют исследовать менее подготовленные поверхности. Наибольшим диапазоном в 300 кгс обладают приборы AIS2100 и AIS3000.

Система AIS, позволяющая производить индентирование с нагрузками до 300 кгс, использует сервомотор переменного тока с

редуктором, тензорезистивную ячейку, измеряющую приложенную нагрузку, и LVDT – сенсор перемещения, детали конструкции представлены в [48].

### 1.3 Получение трехмерного изображения поверхности различными методами

Приборы, позволяющие получать трехмерную топографию поверхности и высоту профиля поверхности можно разделить на группы, согласно их методу функционирования [49,50]:

контактные стилусы (contact stylus)

интерферометры сдвига фаз (phase shifting interferometry, PSI)

интерферометры когерентного сканирования (coherence scanning interferometry)

конфокальные микроскопы (confocal microscopy)

хроматические зонды (chromatic probe)

триангуляторы и приборы структурированного света (structured light and triangulation)

оптические дифференциальные профилометры (optical differential profiling)

микроскопы, использующие вариацию фокуса (focus variation microscopy)

сканирующие электронные микроскопы (angle resolved SEM, SEM stereoscopy)

атомно-силовые микроскопы (atomic force microscopy, AFM)

Контактные методы исследования поверхности, а точнее атомно-силовая микроскопия обычно обладает разрешением вплоть до атомарного, но, по сути, являются скорее лабораторным методом: соответствующие приборы требуют виброизоляции, настройки фотодетектора и лазерного пучка, достаточно прецизионной установки чипа миллиметрового размера с хрупким кантилевером, что фактически исключает возможно применения подобных устройств в полевых условиях. Контактная профилометрия не

обладает достаточным разрешением в латеральном направлении и является весьма медленным методом. Электронные микроскопы являются лабораторными приборами, работающими с образцами небольших размеров, требующими вакуума или контролируемой атмосферы. Наиболее быстрыми и наименее прихотливыми в использовании являются оптические методы.

Интерференционные микроскопы являются, пожалуй, наиболее старыми и зрелыми оптическими методами построения 3D-изображений поверхности. В данных устройствах топография объекта получается путем математической обработки интерференционных картин, полученных на разной высоте от поверхности. В интерферометрах сдвига фаз высота измеряемой поверхности прямо пропорциональна интерференционной фазе. Повторяемость измеряемых высот составляет величину менее одного нанометра [51], данные устройства считают [52] чем-то вроде «золотого стандарта».

Прежде чем перейти к дальнейшему описанию, возможно, стоит сделать отступление и, следуя работе [53], отметить, что в силу отсутствия международно принятого определения термина «разрешение по высоте» в спецификациях интерферометрических приборов связанные с этим понятием величины могут отличаться на два порядка, соответствуя, например, цифровому разрешению или среднеквадратичному отклонению величины. Согласно стандарту ISO 25178 «шумом прибора» называется величина внутреннего шума, добавленная к выходному сигналу метрологической системы, которая помещена в идеальные условия с минимальными возмущениями. На рисунке 10 изображена зависимость среднеквадратического отклонения сигнала высоты при последовательном сканировании «супер-гладкой» поверхностей, полученного на интерферометре фазового сдвига (PSI) с дополнительной компенсацией ошибок синусоидальной модуляцией фазы [54]. Данная величина названа повторяемостью, характеризующей шум прибора.

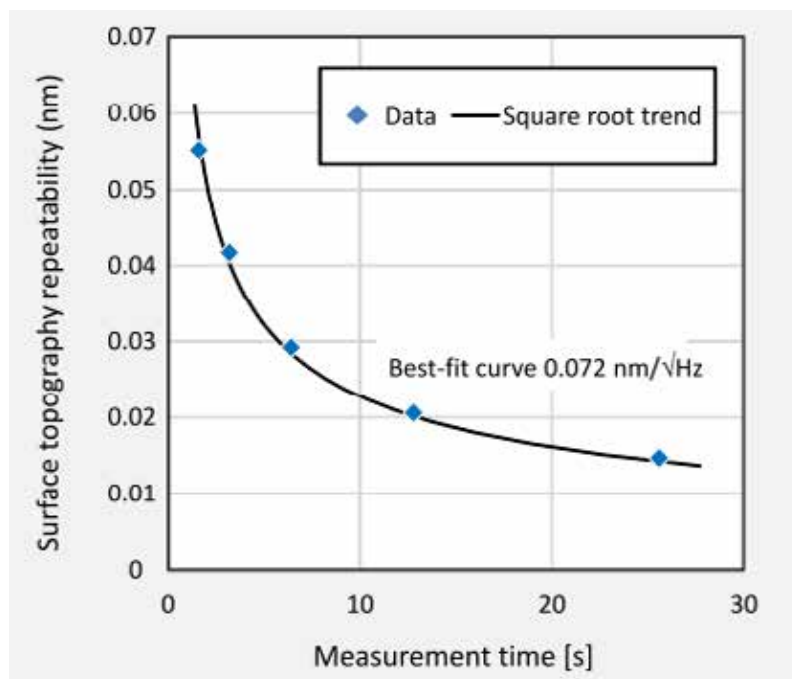


Рисунок 10 – Зависимость шумов от времени усреднения для прибора Nexview 8300 с технологией PSI [54]

Вместе с высокой разрешающей способностью PSI известная проблема данных устройств – неоднозначность определения высоты, связанная с тем, что PSI-алгоритмы возвращают фазу по модулю  $2\pi$ ; в результате итоговое изображение может содержать артефакты (например, ступеньки). Согласно [55] PSI используется для сканирования оптически гладких поверхностей: глобальный перепад высот может составлять десятки микрометров, однако резкие скачки более  $\sim 150$  нм или же, наоборот гладкие поверхности различаются проблематично. Особенностью PSI-измерений является также их чувствительность к вибрациям; помимо механического демпфирования колебаний для подавления данного эффекта также используют программные алгоритмы, пример использования которых приведен на рисунке 11.

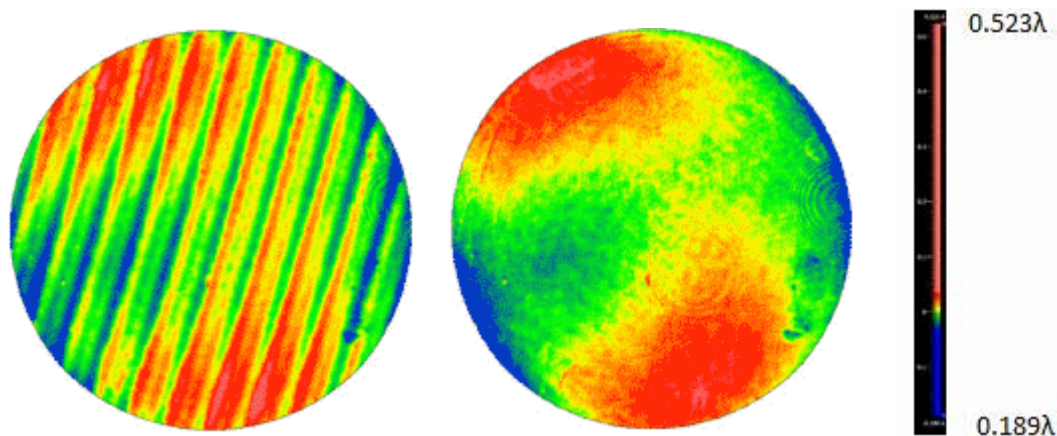


Рисунок 11 – Пример подавления вибрационных артефактов на PSI изображении с использованием технологии QPSI [56]

Интерферометрия когерентного сканирования (CSI) расширяет возможности интерферометрии для исследования шероховатых поверхностей с уступами, а также прозрачных пленок. В основе работы данных приборов лежит принцип сканирования высоты с определением положения, при котором интерференционные полосы являются наиболее контрастными. Для каждой  $(x,y)$  позиции высота поверхности  $z$  может быть найдена по максимуму огибающей (рисунок 12).

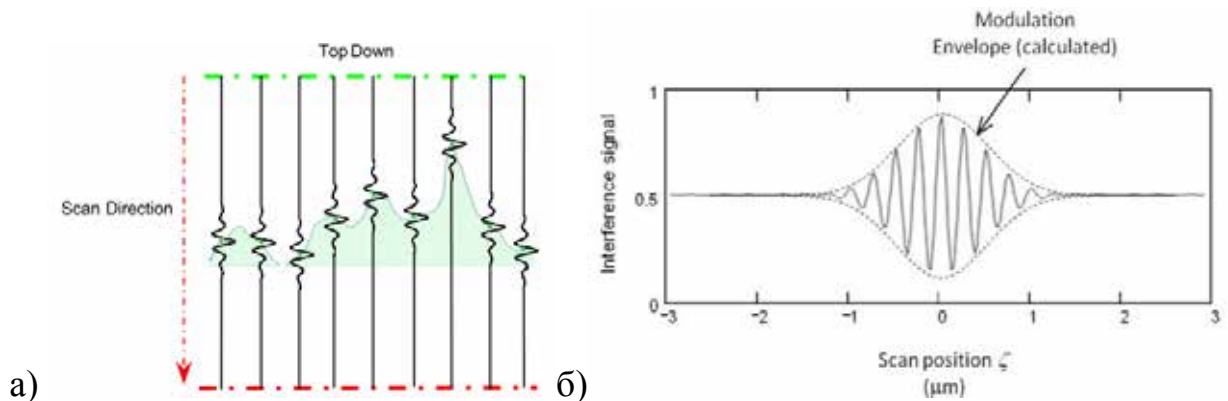


Рисунок 12 – а) схематическое изображение сигналов CSI, полученных для разных точек поверхности [57] б) CSI сигнал для заданного положения в плоскости и его огибающая [51]

CSI-интерферометры, использующие данный контраст по высоте, называются также интерферометрами вертикального сканирования (vertical-scanning interferometry, (VSI)), которые также называются интерферометрами белого света (white light interferometry (WLI)), или же, возможно более реже когерентными радарными и когерентными профилометрами [54]. Вертикальное разрешение данных устройств составляет величины

ангстремного порядка, латеральное разрешение – сотни нанометров (согласно спецификации Zygo NewView 8300). К положительным сторонам WLI можно отнести то, что их разрешение практически не зависит от увеличения [58]. В качестве короткого промежуточного вывода можно отметить, что PSI в целом являются более прецизионными устройствами, в то время как CSI можно использовать для более неоднородных поверхностей. Сравнения качества сканирования плоской поверхности и поверхности со структурой при помощи данных двух методов демонстрирует рисунок 13.

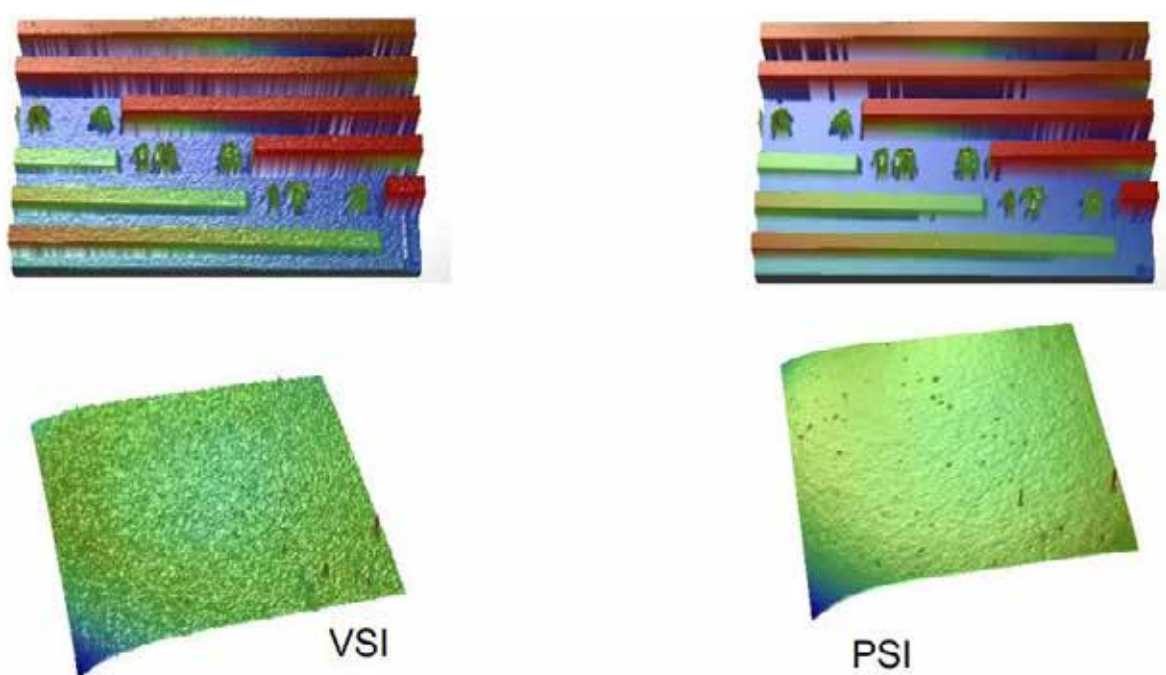


Рисунок 13 – Поверхности объектов, отсканированные при помощи методов VSI и PSI [59]

Конфокальный микроскоп для формирования изображения использует диафрагму, блокирующую свет, поступающий не из фокальной плоскости объектива. Для каждой высоты получают контрастные изображения, из которых восстанавливают трехмерную топографию поверхности. Пример серии подобных изображений, а также топография восстановленной поверхности приведены на рисунке 14 [51].



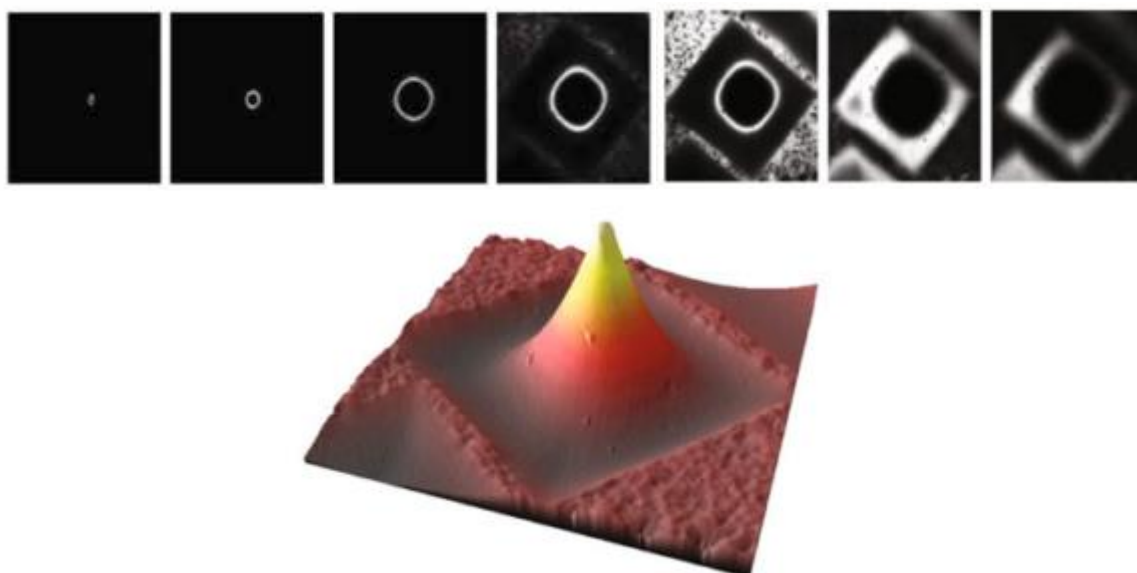


Рисунок 14 – Серия конфокальных изображений и восстановленная по ним трехмерная поверхность [51]

В зависимости от типа ограничивающей диафрагмы (pinhole), обеспечивающей отсечение пучка света, конфокальные микроскопы можно разделить на сканирующие лазерные конфокальные микроскопы (Laser Scanning Confocal Microscopes (LSCMs)), дисковые сканирующие лазерные микроскопы (Disc Scanning Confocal Microscope (DSCM)), а также микроскопы, использующие на месте диафрагмы программируемый массив (Programmable Array Confocal Microscopes (PACMs or PAMs)). LSCMs используют диафрагму с единичным отверстием, изображение получается путем сканирования лазерного пучка по поверхности образца. В устройствах DSCM свет пропускается и собирается через вращающийся диск с отверстиями, устройства PACM используют параллельное освещение для ускорения скорости сканирования, в качестве источника модулированного света используют жидкие кристаллы на кремнии, а также цифровые микрозеркала (digital micro-mirror devices).

Вертикальное разрешение конфокальных микроскопов с пятидесятикратным объективом и числовой апертурой 0.5 достигает нескольких нанометров, латеральное – порядка микрометра и менее [60].

К ограничениям конфокальных микроскопов можно отнести максимально измеряемый угол поверхности, который зависит от апертуры объектива и может составлять, например,  $71^\circ$  для апертуры 0.95 (увеличение 150x) или  $8^\circ$  (апертура 0.15, увеличение 5x) [61]. Превышение указанного угла приводит к выбросам на восстановленном изображении, пример которых приведен на рисунке 15.

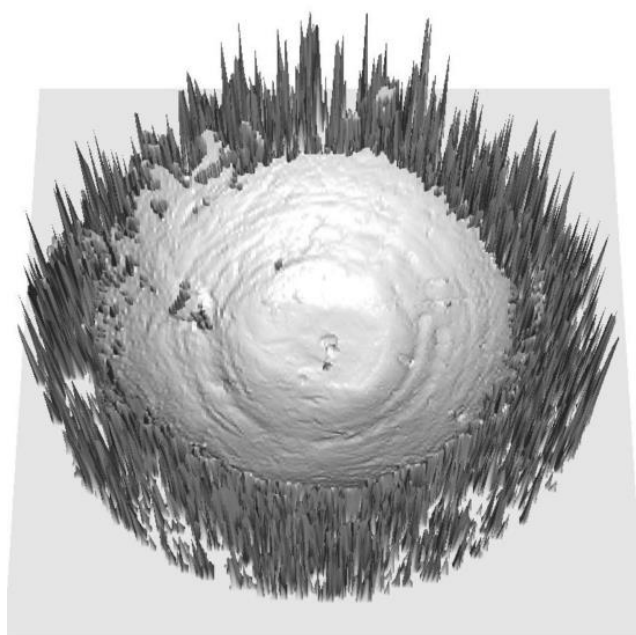


Рисунок 15 – Выбросы на изображении, полученные при сканировании конфокальным микроскопом при превышении максимального угла сканирования [49]

Большие наклоны поверхности можно измерять при помощи метода вариации фокуса (focus variation), который является более стабильным для подобных измерений [62].

В настоящее время существуют приборы, совмещающие обе указанные функции: конфокальную микроскопию для измерения шероховатости и вариацию фокуса для изменения наклона поверхности [63]. Соответствующий пример совмещения данных в рамках одних и тех пространственных координат представлен на рисунке 16.

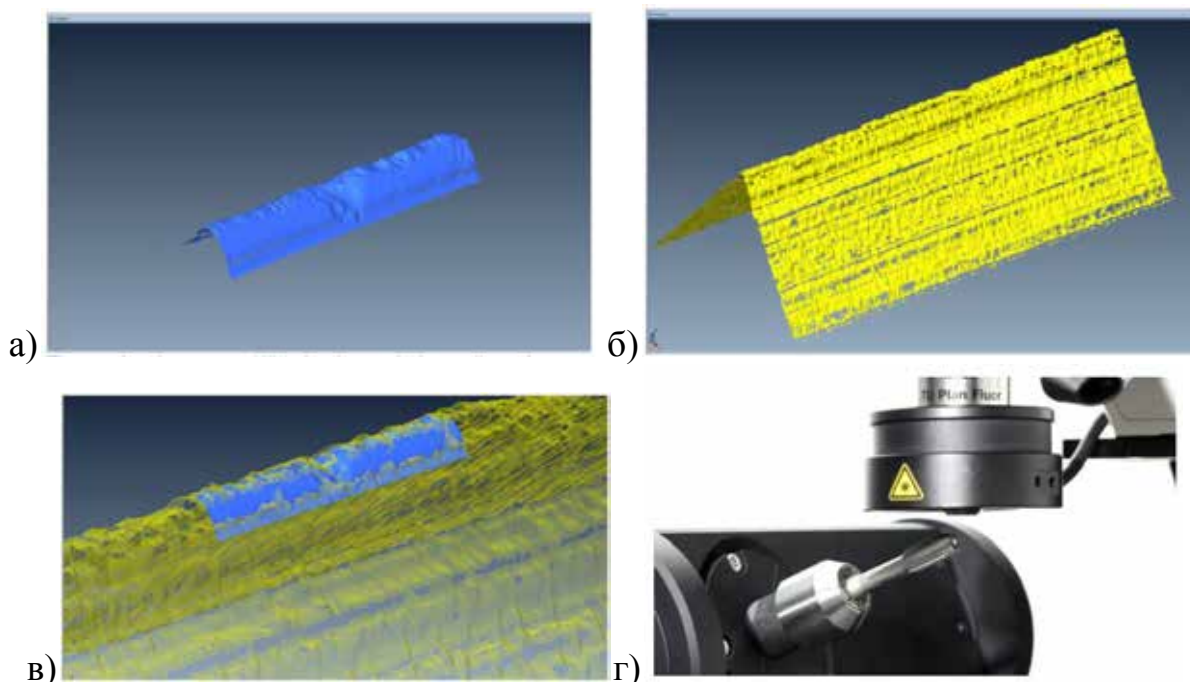


Рисунок 16 – Пример совместного использования методов конфокальной микроскопии и вариации фокуса для измерения шероховатости и наклона режущего элемента: а) – изображение конфокальной микроскопии, б) – изображение, полученное методом вариации фокуса, в) совмещение двух изображений г) измеряемый образец в держателе

Другими приборами, совмещающими сразу три технологии: интерферометрию, конфокальную микроскопию и вариацию фокуса, являются устройства Sneoх компании Sensofar [64].

Интерферометрические методы включают метод PSI, обеспечивающий субнанометровое разрешение для всех числовых апертур, его вариант, обладающий расширенным диапазоном перемещений – метод ePSI. Как предварительно следует из приведенной выше информации, метод PSI подходит для измерения гладких и равномерных поверхностей, с субнанометровым разрешением, которое сохраняется даже при использовании объективов с малым увеличением (2.5x). Другим интерферометрическим методом приборов Sensofar является интерферометрия белого света вертикального сканирования (VSI, как было указано выше, данный термин – другое название для метода CSI). Согласно приведенным ранее сведениям, данные методы можно использовать для более шероховатых поверхностей, однако они обладают более низким разрешением: в данном случае 1 нм, против 0.1 нм (0.01 нм) для методов

PSI/ePSI (в скобках указана величина при использовании пьезокерамического вертикального сканера); данные величины не зависят от увеличения. Максимальный наклон поверхности для интерферометрических методов зависит от увеличения и составляет от 3 до 42 градусов.

Метод конфокальной микроскопии приборов Sensofar вместо движущихся частей использует микродисплей на основе сегнетоэлектрических жидких кристаллов на кремнии (FLCoS), что обладает преимуществом перед MEMS – зеркалами в виде расширенного срока эксплуатации. Вертикальное разрешение конфокальных методов зависит от увеличения и изменяется от 300 до 1 нм (при изменении увеличения от 2.5x до 150x), измеряемые углы – от 3 до 71 градуса соответственно.

Последний метод – вариация фокуса может измерять поверхности с наклоном до 86 градусов, обладает наиболее высокими скоростями сканирования (до мм/с), большой верхней границей измеряемых глубин, однако и наименьшим разрешением (величина  $Sa$  больше 10 нм). В целом, диапазон применения методов представлен на рисунке 17.

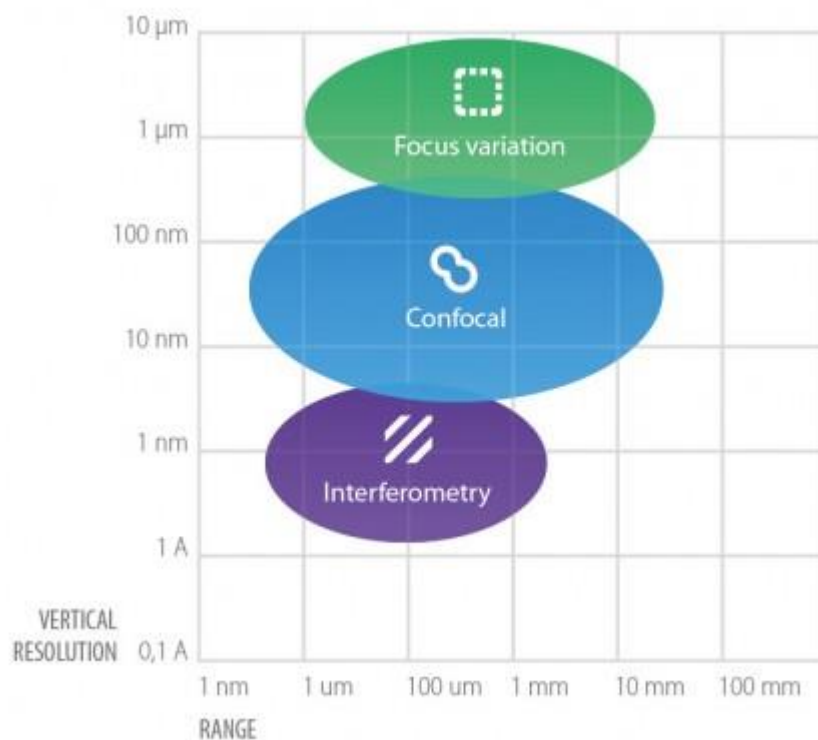


Рисунок 17 – Разрешение и диапазоны применения различных методов прибора Sneox [64]

Таким образом, наиболее полная характеристика объекта достигается при совмещении изображений, полученных в рамках различных методов. Вместе с тем, для области механических исследований и изучения отпечатков, полученных даже на полированных изделиях с нагрузками от десятков миллиНьютон до нескольких килоНьютон, достаточно применения конфокальной микроскопии. Данное замечание относится к исследованиям металлов, пластиков и даже керамик пирамидальными наконечниками Берковича и Виккерса, а также сферическими с радиусом кривизны от десятка микрометров до нескольких миллиметров.

Другими достаточно распространенными устройствами, упомянутыми в начале данной главы, являются хроматические зонды, среди которых можно выделить монохроматические и полихроматические (хроматические) зонды. Можно отметить, что недостатком монохроматических зондов является невозможность определения знака Z координаты при отсутствии движения зонда, поэтому в данных устройствах с помощью камертона создают дополнительную вибрацию на частотах килогерцового диапазона

[65]. Принцип работы данных приборов во многом сходен с рассмотренными выше конфокальными микроскопами: свет, отраженный от поверхности, проходит через отверстие при условии, что поверхность находится в фокусе линзы. В целом, более распространёнными являются именно хроматические зонды, в которых используются хроматические линзы, разлагающие белый свет в спектр (рисунок 18), таким образом, при отражении от поверхности находящейся в фокусе доминирует только одна волна (точнее узкий диапазон волн) что и позволяет более точно определить положение объекта [66].

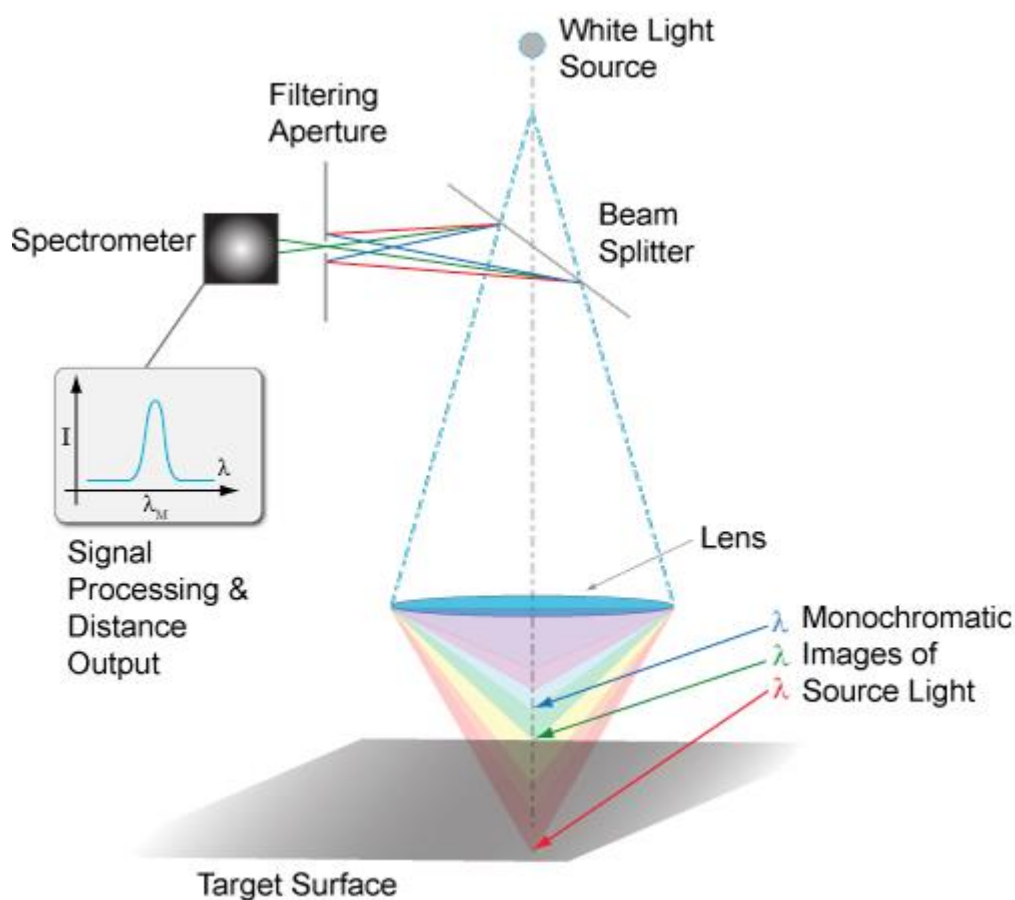


Рисунок 18 – принцип работы хроматического зонда [67]

Принципиальным отличием хроматических зондов от конфокальных микроскопов является то, что наличие поверхности детектируется для одной точки (X,Y), а не для всей плоскости, что и обуславливает использование данных устройств прежде всего в качестве профилометров, а не сканеров, хотя и такое применение является возможным. Описанный выше недостаток зондов обуславливает их цену, которая не превышает 10 тысяч € [68], что практически на порядок меньше цены конфокального микроскопа.

Вертикальное разрешение данных устройств также несколько хуже конфокальных микроскопов, так, например, для конфокальных зондов STIL минимально измеряемая высота ступеньки высоты составляет от 5 нм до 0.3 мкм [69], однако при этом данные устройства обладают и достаточно большим измеряемым диапазоном: от 100 мкм до 42 мм. В связи с указанным выше отличием латеральное разрешение зондов от  $\sim 1$  мкм до нескольких десятков микрометров, что ниже, чем у конфокальных микроскопов.

Отдельным видом микроскопов, упоминаемых в стандарте [50], являются дифференциальные интерференционно-контрастные микроскопы, называемые также микроскопами Номарского (Differential Interference Contrast microscopy (DIC), Nomarski Interference Contrast (NIC)). Данный вид микроскопов применяется для отображения образцов, не обладающих или практически не обладающих оптическим контрастом. Схему, содержащую принципиальные элементы, составляющие данный микроскоп, можно найти например в [70], она приведена на рисунке 19.

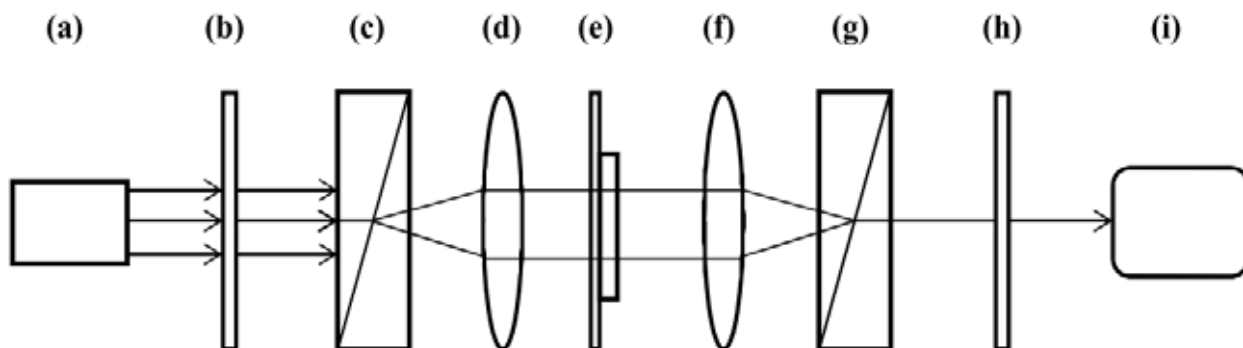


Рисунок 19 – Структурная схема DIC микроскопа согласно [70]: а) источник света, б) поляризатор, в) первая призма Волластона д) собирающая линза е) образец ф) объектив г) вторая призма Волластона h) анализатор и) CCD камера

Свет из источника (а) поступает в поляризатор (b), создающий линейную поляризацию ( $45^\circ$ ). Свет из поляризатора попадает на призму Волластона, в которой обыкновенный и необыкновенный луч приобретают сдвиг фаз, который различен для лучей, попавших в призму на разном расстоянии от места склейки. Два луча собираются линзой (d) в параллельный пучок и проходят через образец. Расстояние между лучами

обычно является достаточно малым – меньше, чем разрешающая способность объектива. После прохождения через образец лучи приобретают различный сдвиг фаз, так как они прошли через различные области. Линза-объектив фокусирует лучи на вторую призму Волластона, которая убирает существующее между ними пространственное разделение. Поляризатор (h) поляризует лучи ( $135^\circ$ ) так, чтобы у них совпала плоскость колебаний, что приводит к итоговой интерференции лучей. В итоге одна из сторон объекта выглядит яркой (или цветной), а другая темной (или другого цвета), что создает псевдо-трехмерное изображение объекта. Данный тип микроскопии применяется для биологических объектов (рис 20а), однако известны и другие применения (рис 20б). Отдельно можно отметить, что существует также отражающая DIC – микроскопия, применяемая для металлографических образцов, сплавов, металлов, полупроводников, стекол, полимеров и композитов [71]. Данный тип микроскопии позволяет различить детали нанометрового размера, его применение в частности востребовано, например, для контроля деталей микросхем, где контраст создает комфорт для наблюдения деталей. Вместе с тем, несмотря на достаточно привлекательную возможность обеспечения контраста изображения, огромным недостатком по-прежнему остается то, что DIC микроскопия не дает действительного трехмерного изображения. В целом можно отметить, что данный вид микроскопии не является наиболее подходящим для контроля остаточных отпечатков, и скорее более пригоден для исследования специфических объектов.

В завершение обзора можно отметить, что существуют также приборы структурированного света, которые позволяют получить трехмерное изображение объекта, данные объекты согласно [72] можно соединить в один класс триангуляторов (рисунок 21а), ориентировочный диапазон и разрешение устройств согласно [66] приведено на рисунке 21б.



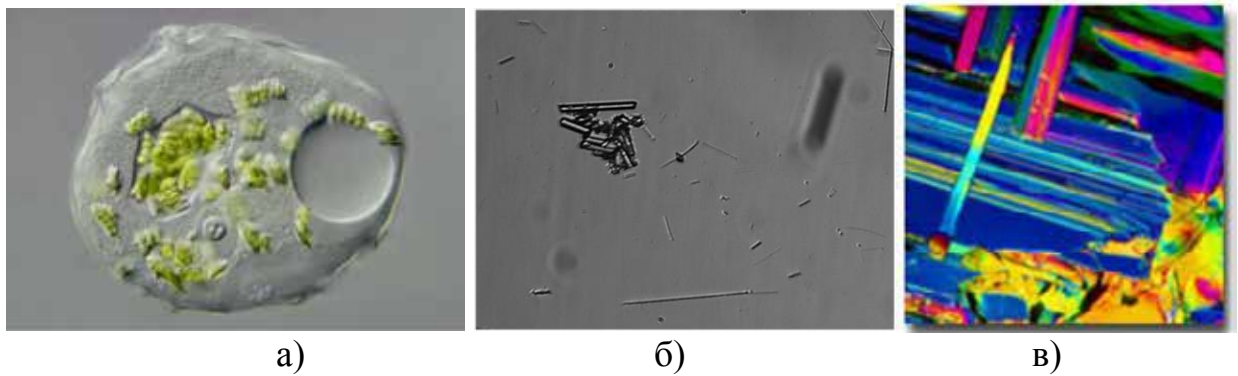


Рисунок 20 – а) изображение thecae [73] б) изображение асбеста и стеклянных волокон, полученное при помощи DIC микроскопии [70] в) изображение, полученное при помощи отражающей DIC [71]

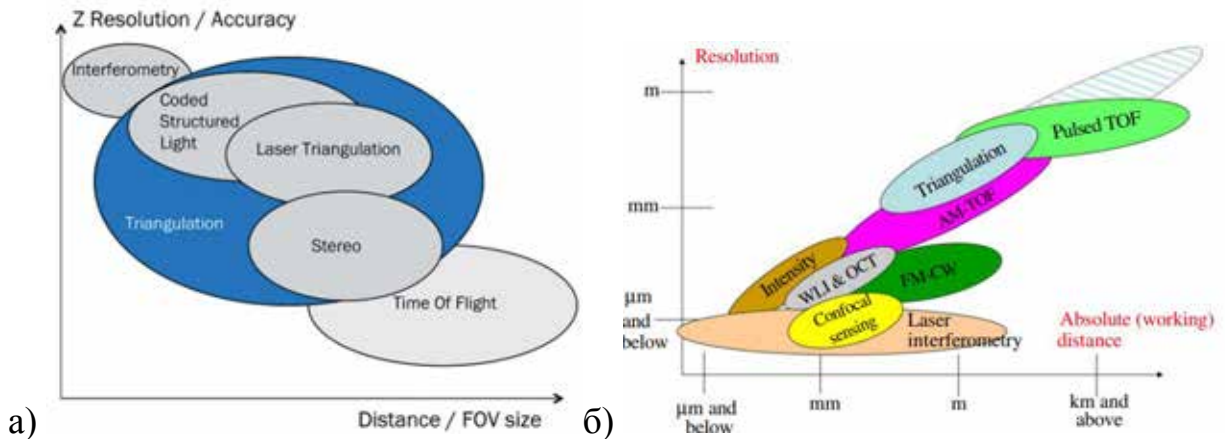


Рисунок 21 – а) Классификация методов восстановления трехмерной поверхности объектов согласно [72], б) разрешающая способность и диапазон оптических методов согласно [66]

Вместе с тем, можно отметить, что в настоящее время существуют приборы структурированного света, [74], которые позволяют сканировать поверхность с латеральным разрешением 1.2 мкм и вертикальным разрешением 100 нм.

В качестве вывода можно отметить, что для контроля шероховатости и формы поверхности остаточного отпечатка миллиметрового диаметра можно рекомендовать конфокальные микроскопы (или конфокальные профилометры для более грубого, но более доступного решения), а также приборы структурированного света, позволяющие фиксировать форму поверхности с микрометровым разрешением.

## **Результаты и выводы раздела**

Проведенный аналитический обзор продемонстрировал актуальность решаемой в данной ПНИЭР задачи по созданию экспериментального образца iPoRTH. Как показало изучение доступных источников в мире достаточно широко и результативно идут исследования по разработке методов и аппаратуры для контроля механических свойств готовых изделий и работающих конструкций методами инструментального индентирования. При этом присутствующие на рынке импортные готовые изделия не могут быть напрямую использованы для решения задач поставленных в ТЗ. Обзор продемонстрировал наличие большого количества приборов, которые могут быть использованы в качестве прототипов iPoRTH. Анализ имеющегося в наличии оптического оборудования для контроля формы, фактуры и шероховатости исследуемой поверхности продемонстрировал возможность использования готовых технических решений и коммерческого оборудования для реализации системы оптического контроля высоты профиля поверхности тестируемых изделий. При этом наличие образцов конфокальных профилометров, предназначенных для промышленного применения, позволяет использовать эти приборы в составе разрабатываемого роботизированного экспериментального образца iPoRTH.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.1 ПГ и п.3.1 ТЗ.

## 2 Патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96

В соответствии с п.1.2 плана-графика работ по ПНИЭР проведены патентные исследования согласно ГОСТ Р 15.011-96. Результаты представлены в Приложении А.

### 3 Разработка вариантов возможных технических решений задачи создания экспериментального образца iPoRTH

Согласно требованиям ТЗ (п.4.3.1.1.1) экспериментальный образец iPoRTH должен состоять из: индентационного измерительного модуля, измерительного модуля оперативного контроля; цифрового оптического микроскопа, оптического конфокального профилометра, системы крепления и позиционирования измерительных модулей, электронного блока управления, вычислительного блока сбора и обработки данных, системы электропитания, аккумуляторной батареи, комплекта тестовых образцов твердости и шероховатости, модуля беспроводной цифровой связи, управляющего программного обеспечения.

Все выше перечисленные модули должны быть сопрягаемы в единый измерительный комплекс и допускать высокий уровень автоматизации всех проводимых с их помощью измерений. При этом принципиально новыми и разрабатываемыми в рамках ПНИЭР элементами являются индентационный измерительный модуль, измерительный модуль оперативного контроля и система крепления всей совокупности измерительного оборудования на исследуемом изделии. Остальные изделия, включая цифровой оптический микроскоп и хроматический конфокальный профилометр, являются интегрируемыми в измерительную установку функционально законченными покупными изделиями. Именно индентационные модули, их конструкция, тип первичных преобразователей, а также рабочий диапазон прикладываемых нагрузок и перемещений являются ключевыми интеллектуально емкими элементами, определяющими требования к электронному блоку управления, аккумуляторным батареям и способу обработки получаемых данных в ПО.

Для конкретизации области поиска возможных технических решений, пригодных для создания данных модулей надо иметь в виду, что согласно требованию п. 4.3.1.2.2 ТЗ Индентационный измерительный модуль должен

проводить измерения путем вдавливания сферообразного наконечника. Этот метод, позволяющий производить измерение диаграммы нагрузка-пластическая деформация и вычисление сопутствующих величин: предела текучести, коэффициента и показателя деформационного упрочнения, определен в п. 4.1.3 ТЗ (метод АВІ). Согласно требованиям п. 4.3.1.3.5 и 4.3.1.3.7 ТЗ максимальные диапазоны нагрузки и перемещения в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация должны составлять 3000 Н и 1 мм. Согласно требованиям п. 4.3.1.3.2 ТЗ для индентирования должны использоваться сферические или сферообразные (сфероконические или иные) наконечники с радиусом кривизны кончика от 300 мкм до 2.5 мм.

Таким образом, требуется разработать модуль, позволяющий измерять диаграмму сила-углубление с нагрузками до 3000 Н и глубинами до 1 мм. Кроме того, можно отметить, что совокупность представленных выше требований означает, что углубление сферического или сферообразного наконечника в образец должно измеряться при достаточно большой контактной жесткости области индентирования: учитывая диаметр области контакта  $d \sim 1$  мм, а также модуль Юнга типичных сталей  $E \sim 200$  ГПа, можно оценить жесткость контакта на уровне  $S \sim 2 \cdot 10^8$  Н/м. Такое высокое значение контактной жесткости однозначно определяет тип возможной кинематической схемы измерения и исключает возможность использования конструкций, в которых заглубление измеряется с помощью внутреннего датчика перемещений, а деформация корпуса индентора и системы его позиционирования учитываются с использованием априорных данных о жесткости системы крепления и величине силы, приложенной к индентирующему штоку внутренним актюатором.

Требования к измерительному модулю оперативного контроля определяются в п. 4.3.1.2.3 и 4.3.1.3.3 ТЗ: должны использоваться наконечники в форме пирамиды Берковича с постоянным углом между высотой и гранью. С помощью данных, измеренных таким наконечником согласно ГОСТ 8.748-2011 (пункт ТЗ 4.2.4), определяются значения

твердости и модуля упругости, причем согласно п. 4.3.1.3.4 и п. 4.3.1.3.6 максимальное усилие составляет 5 Н, а максимальная глубина – 25 мкм.

Каждое из рассматриваемых устройств производит измерение механических свойств по диаграмме нагрузка-углубление (инструментальное индентирование) и с необходимостью содержит некоторый актюатор, приводящий к взаимному встречному движению наконечника индентора и образца, а также сенсор, производящий измерение нагрузки или глубины, или же два сенсора, измеряющих как приложенную нагрузку, так и углубление. В зависимости от количества сенсоров возможны две кинематические схемы, представленные на рисунке 22.

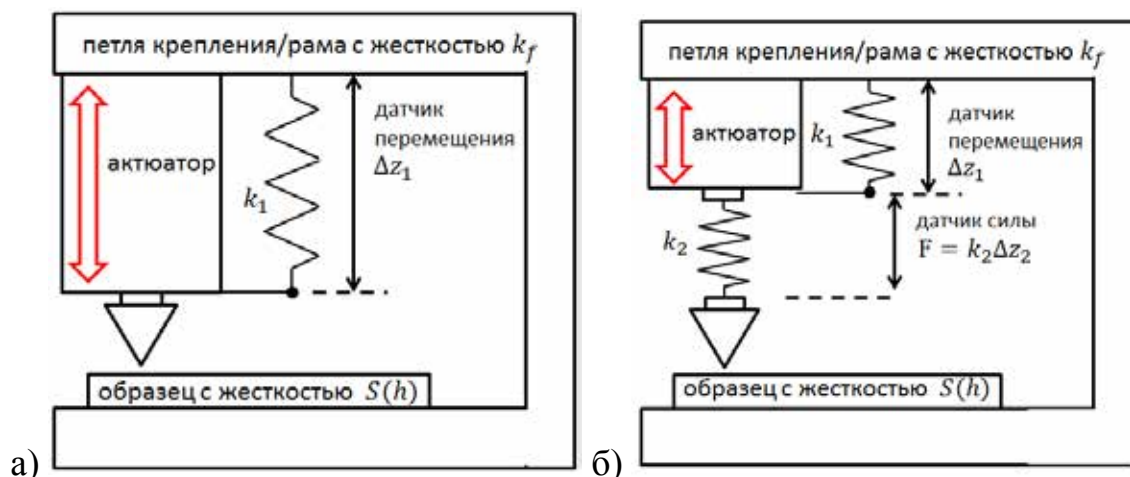


Рисунок 22 – Кинематическая схема инструментального индентора: а) без датчика силы б) с датчиком силы

В схеме рисунка 22а актюатор прикладывает нагрузку напрямую к индентору. Существенным плюсом такой конструкции является высокая жесткость такой системы: перемещение  $z_1$  практически соответствует углублению  $h$ . Отличие  $h$  от  $z_1$  обусловлено большой, но все-таки конечной жесткостью рамы  $k_f$ , а также податливостью штока (части держателя индентора), который обычно расположен между актюатором и алмазным индентором. В данном случае предполагается, что актюатор прилагает заданную силу к штоку, т.е. просто обеспечивает заданную силу  $F$  между крайними точками пружины  $k_1$ . Устройством, которое выдает заданную силу, может быть пара катушка-магнит: в которой сила  $F$  пропорциональна

приложенному току  $I$ . Соответственно, для подобной конструкции необходимым элементом электроники является блок, поддерживающий и изменяющий ток через катушки. Явным недостатком данного актюатора является его нагрев во время работы. Кроме того, следует отметить, что для существующих электромагнитных актюаторов максимальная нагрузка определяет размер изделия. Естественно, что для различных материалов для изготовления постоянного магнита минимальный размер изделия будет различным. Как видно из рисунка 23а, наиболее сильные и широко используемые в настоящее время магниты изготавливаются из соединения неодим-железо-бор, кривая размагничивания для данного материала представлена на рисунке 23б. Актюатор, изготавливаемый из данного материала компанией H2W, имеет максимальную силу до 600 Н при внешнем диаметре порядка 9 см [75]. Для сравнительной оценки можно отметить, что изготавливаемые данной компанией актюаторы на максимальную нагрузку  $\sim 5$  Н имеют размер  $\sim 1-2$  см, а при нагрузке  $\sim 5000$  Н – диаметр порядка 15 см [76]. Стоит также отметить, что выделяемая в катушке тепловая мощность при нагрузке  $\sim 5$  кН составляет 3.5 кВт, а при нагрузке 5 Н – десятки Вт. Удержание заданного значения нагрузки при использовании такого типа актюатора предполагает поддержание заданного значения тока и затрудняет корректное измерение ползучести материала при максимальной рабочей нагрузке.

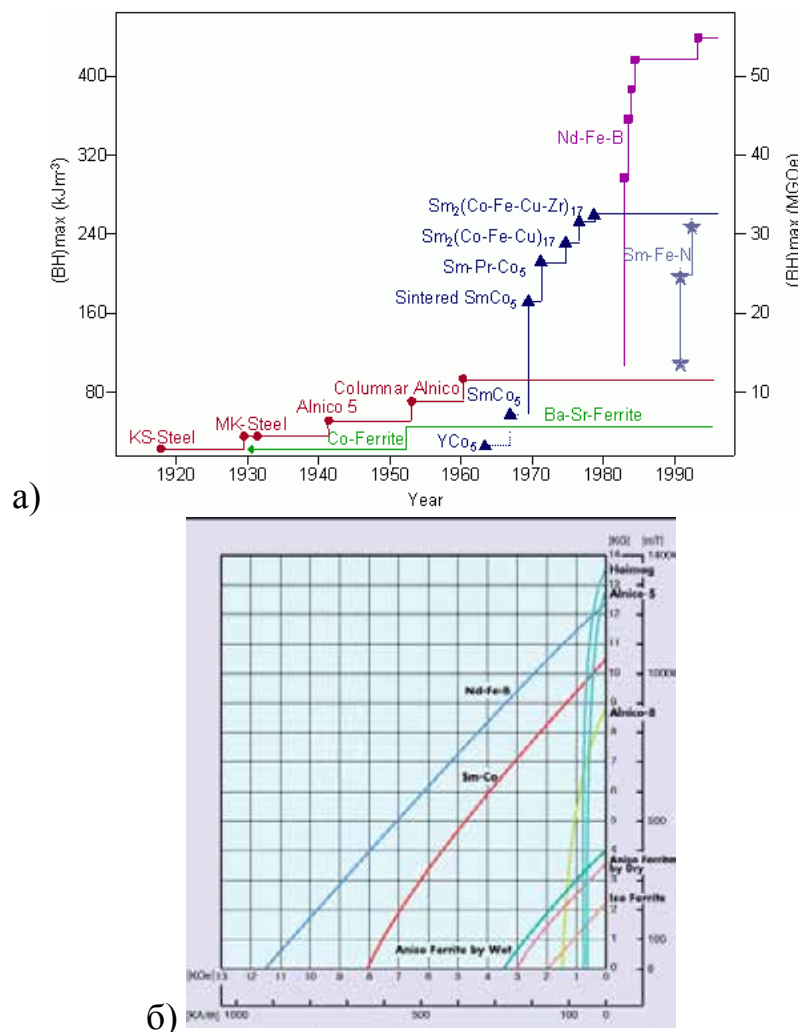


Рисунок 23 – а) Используемые материалы для изготовления постоянных магнитов [77], б) Кривая размагничивания для основных материалов [77]

Таким образом, в целом можно отметить, что электромагнитные актюаторы оптимально применять для нагрузок на уровне нескольких Ньютон и менее перспективно при силах на уровне нескольких кН: подобное изделие будет представлять собой весьма громоздкую конструкцию и будет выделять значительное количество тепла, что приведет к существенным термодрейфам, искажающим получаемые данные.

Такого рода решения будут оптимальны для измерительного модуля оперативного контроля, работающего с нагрузками в несколько Ньютон, и оно планируется к применению в ходе разработки этого модуля на следующем этапе ПНИЭР.



Возвращаясь к рисунку 22а можно отметить, что в случае актюатора, задающего не силу, а перемещение подобная конфигурация теряет работоспособность: если приложенная сила неизвестна, ее необходимо измерять, что приводит к схеме рисунка 22б.

В схеме рисунка 22б актюатором могут служить различные изделия, приводящие к перемещению конструкции: пьезостеки, коллекторные и шаговые двигатели (линейные трансляторы). Пьезостолы, используемые, например, в сканирующих зондовых микроскопах, обеспечивают прецизионные перемещения на уровне десятков микрометров по Z и ста мкм по XY, допуская при этом максимальную силу не более  $\sim 1$  Н [78]. Для обеспечения движения на  $\sim 150$  мкм вдоль одной оси с нанометровым разрешением можно использовать пьезостолы Newport [79], максимальная нагрузка которых составляет уже 10 Н.

Для больших нагрузок (на уровне 3 кН) приложение необходимого усилия можно осуществлять при помощи шагового двигателя и пары гайка-винт. Так, например, для винта Т8 диаметром 8 мм с шагом 2 мм и гайки, выполненной из латуни (предел текучести более 240 МПа [80]) можно согласно [81] (при длине контакта гайки с винтом 10 мм) оценить допустимый момент и линейную нагрузку: данные величины составляют порядка 15 Н/м и 7 кН. Такая величина момента вполне может быть обеспечена шаговыми двигателями постоянного или переменного тока, создающими момент до 37 Н/м [82]. Данные двигатели обладают размером 9 см, что вполне допустимо для конструкций килоньютонового диапазона.

Кроме того, приложение нагрузки можно осуществить при помощи коллекторного двигателя. Диапазон существующих максимальных нагрузок для данных устройств достаточно широк и изменяется от величины порядка 1 Н до нескольких сотен кН. В целом большая часть имеющихся в наличии актюаторов на большие нагрузки основана на двигателях именно коллекторного типа. В сравнении с самостоятельной сборкой актюатора с шаговым двигателем использование готового актюатора коллекторного типа

минимизирует риски разработки, позволяя использовать готовые надежные и проверенные временем решения. К преимуществам коллекторных двигателей можно отнести их простоту в управлении, к их недостаткам – низкий диапазон регулировки скорости, меньшую в сравнении с шаговыми двигателями прецизионность. При этом практически всегда возможно изготовление промышленного актюатора с другими типами двигателей, включая шаговые.

Существует широкий круг датчиков, которые можно использовать для измерения перемещений: оптические и, в частности, интерференционные, в том числе лазерные, дифференциальные трансформаторы (LVDT), емкостные датчики, резистивные, пьезорезистивные, пьезоэлектрические, электротермические датчики, датчики вихревого тока, магнитные энкодеры. В одной из книг [1], посвященных наноиндентированию, т.е. приборов измеряющих твердость и модуль упругости по диаграмме нагрузка-углубление (согласно стандарту ISO 14577 [83] и ГОСТ 8.748-2011 [3]. Приставка «нано» требуется при измерении механических свойств для углублений менее 200 нм), отмечается, что широко распространенным способом измерения является емкостной датчик с двумя или тремя токопроводящими пластинами, в качестве альтернативного метода указывается LVDT-датчик. Следует отметить, что согласно тому же источнику [1] типичный рабочий диапазон данных устройств составляет 100 мкм. Примером применения емкостного датчика как для приложения силы, так и для измерения перемещения может служить трехпластинный датчик (three plate transducer) компании Bruker (ранее компания Hysitron). Схема функционирования данного устройства приведена на рисунке 24. Данное изделие, выполненное в корпусе сантиметрового масштаба, способно измерять перемещения на уровне 1-10 мкм и прикладывать нагрузки вплоть до ~ 10 мН, небольшой диапазон по силе обусловлен электростатическим характером силы и квадратичной зависимостью между подаваемым напряжением и возникающей силой. Естественно, что емкостной способ

регистрации перемещения далеко не ограничен перемещениями в единицы мкм. Так в инденторах G200 компании Keysight [84] емкостный датчик регистрирует перемещения более 500 мкм, а общий ход штока достигает 1.5 мм. Масштабирование конструкции можно проводить и на более большие перемещение, помня однако о том, что данный способ регистрации приводит к возникновению дополнительных сил, действующих на заряженную обкладку в электрическом поле; как было указано выше, в приборах Hysitron данный эффект используется в качестве полезного, однако очевидно, что может являться и паразитным, особенно в случае кинематической схемы, изображенной на Рисунок 24, когда сила не измеряется непосредственно, а предполагается равной заданной величине (силы возникающие в конденсаторе приведут к паразитному слагаемому к данной заданной величине силы).

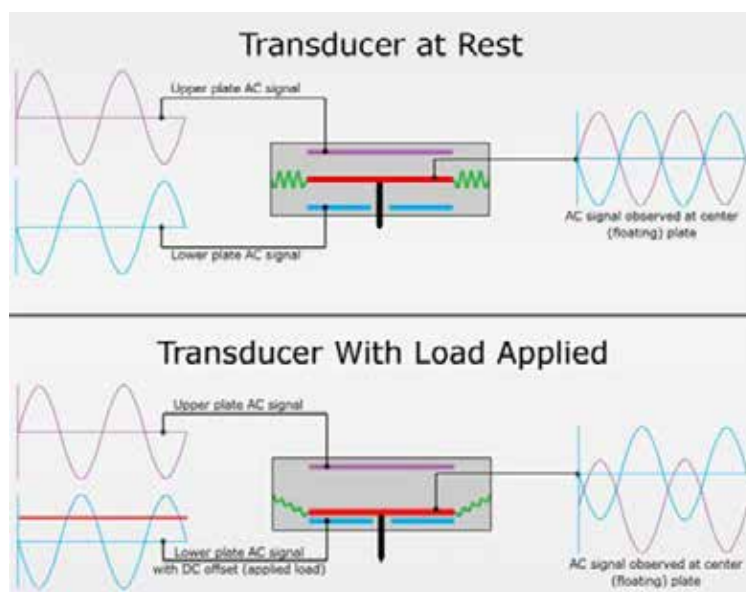


Рисунок 24 – Емкостной датчик компании Bruker (Hysitron) [85]

Датчики LVDT представляют собой сердечник, расположенный внутри цилиндрической капсулы. В центре данной капсулы находится ферромагнитный стержень, вокруг которого расположена центральная обмотка, а по краям – вторичные обмотки. Через центральную – первичную обмотку пропускают переменный ток, а во вторичных обмотках

регистрируют наводимую ЭДС. Одной из положительных сторон LVDT сенсора является его высокая линейность, гарантированная в пределах движения сердечника в области первичных и вторичных обмоток. К положительным сторонам можно отнести и то, что данный датчик не ломается при перегрузке устройства (элементы не упираются друг в друга и не возможна их поломка). К недостаткам данного типа устройств можно отнести чувствительность к внешним магнитным полям и температуре. Данные устройства выпускаются на широкий диапазон измеряемых перемещений: используемые в наноинденторах IBIS датчики обеспечивают шумы на уровне 0.1 нм [86] в то же время аналогичный тип датчиков используется и для измерений перемещений практически вплоть до 0.5 м с точностью десятки мкм [87]. В приборах IBIS LVDT датчики используются и для регистрации нагрузки, диапазон которых составляет от 10 мН до 5 Н с минимальным шумовым уровнем менее 1 мкН. Использование датчиков LVDT для регистрации нагрузки предполагает наличие упругого элемента, который обладает своей нелинейностью, что в общем случае увеличивает нелинейность LVDT датчика силы по сравнению с LVDT датчиком перемещения.

Оценку возможности применению иных датчиков перемещения можно провести с использованием [88]. Тензорезистивные сенсоры являются достаточно доступными и распространенными устройствами контроля перемещений в нано диапазоне. Их основным недостатком является тепловой шум и низкая чувствительность. Оценка шумов при максимальном перемещении в 100 мкм дает величину порядка нескольких десятков нанометров, что обеспечивает динамический диапазон менее 80 дБ. Тем не менее, тензорезистивные элементы являются достаточно распространенными датчиками силы: их используют в разрывных машинах килоНьютонового диапазона (примерами разрывных машин могут являться установки Instron 3300, Zwick Roell ProLine и другие), а также и в наноинденторах Nanovea [89]. Так в Nano и Micro модулях используются тензорезистивные ячейки,

позволяющие измерять силы в диапазонах до 4800 мН и до 400Н, Примером такой ячейкой являются тензорезистивные преобразователи Interface [90]. В комбинации с усилителем, прибор представляет датчик силы. Можно отметить, что усилитель для тензорезистивного датчика является являясь прецизионном устройством с минимальным термодрейфом напряжения смещения широко доступное решение, благодаря массовому использованию тензорезистивных преобразователей в быту, коммерции и на производстве. Электроника необходимая для регистрации сигнала LVDT датчика так же как и емкостных датчиков разрабатывается и изготавливается всеми производителями наноинденторов самостоятельно.

В сравнении с тензорезистивными датчиками, реагирующими на изменение геометрии, пьезорезистивные датчики являются на несколько порядков более чувствительными элементами, используемыми в датчиках давления и акселерометрах. Недостатками этих устройств является их малый диапазон деформаций, высокая чувствительность к температуре, низкая долгосрочная стабильность, заметная нелинейность. В данных устройствах доминирующими также являются тепловые шумы, однако соответствующая оценка, согласно [88] приводит уже к субнанометровой величине при полном диапазоне в 100 мкм. К сожалению, такого типа датчики не пригодны для измерения постоянных и квазистатических нагрузок.

Пьезоэлектрические преобразователи используются как актюаторы, однако, в некоторых случаях и как сенсоры. Данное применение типично для систем виброконтроля, но не для систем позиционирования, что связано с их хорошей чувствительностью на высоких частотах. Можно отметить, что в случае квазистатических перемещений данные элементы демонстрируют эффект ползучести и в таких элементах, как например сканирующие столы атомно-силовых микроскопов, актюаторы на основе пьезоэлементов дополняются емкостными датчиками, измеряющими соответствующие перемещения.

Электротермические датчики известны уже более десяти лет. Их применение связано с разработкой компанией IBM устройств записи и чтения данных, в котором массив из кантилеверов, каждый из которых нагревал (или наоборот - не нагревал, в зависимости от протекающего тока) тонкое полимерное покрытие, образуя с размягчением материала инденты – биты информации [91]. При последующем сканировании при попадании кантилевера в отверстие увеличивался поток тепла в покрытие и подложку, что изменяло сопротивление кантилевера и позволяло судить о наличии или отсутствии данного бита. Устройству требовался недорогой сканер, обладающий диапазоном порядка 100 мкм. В качестве устройства, позволяющего измерять перемещения в данном диапазоне, был предложен микромеханический датчик перемещения [92], схема работы которого представлена на Рисунок 25.

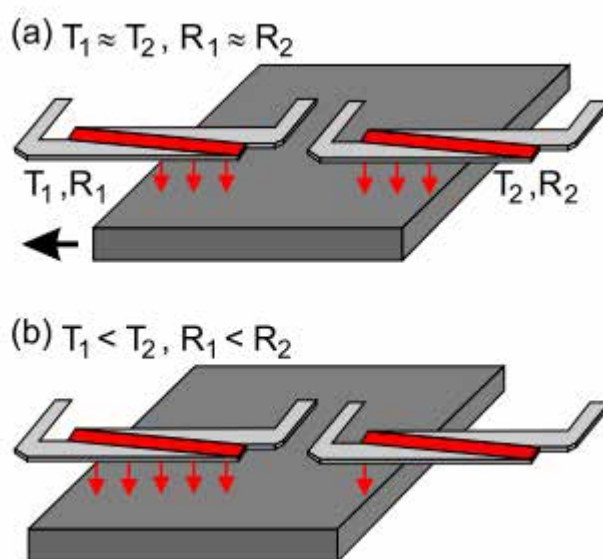


Рисунок 25 – Дифференциальный микромеханический сенсор перемещения [92]

В случае, когда на оба сенсора подано напряжение, происходит их нагрев. Если находящаяся под ними подвижная пластина расположена несимметрично, то один из сенсоров нагревается сильнее, что в силу возникающего различия в сопротивлении элементов приводит к появлению разницы протекающих между ними токов. Данная разница может служить

индикатором положения пластины. Интересно отметить, что, несмотря на то, что обычно процесс теплообмена является медленным при микрометровом зазоре между сенсорами и подвижной пластиной, процесс охлаждения и нагрева обладает достаточной скоростью, что обеспечивает регистрацию положения в диапазоне 100 мкм в полосе 10 кГц. В зависимости от потребляемой мощности устройство позволяло получить разрешение лучше, чем 0.5 нм, обладая разрешением в несколько нанометров при мощности 10 мВт/сенсор [92].

Датчики вихревого тока работают на принципе электромагнитной индукции, что позволяет измерять расстояние между экранированной или неэкранированной катушкой с сердечником и проводящей мишенью. Подобные датчики активно применяются в промышленности, а также в бытовых целях, примером могут служить датчики, позволяющие измерить толщину слоя краски на автомобиле. Широкое применение обусловлено нечувствительностью к наличию пыли и некоторых видов загрязнений между сенсором и объектом. Типичные диапазоны измерения составляют от 100 мкм до 80 мм. К недостаткам приборов можно отнести их чувствительность к температуре.

Лазерные интерферометры являются одними из наиболее метрологически обоснованных способов регистрации, однако, они громоздки и неоправданно дороги.

Линейные энкодеры идеально подходят для измерения больших перемещений с высокой относительной точностью. Дробный шаг таких энкодеров может составлять величину всего несколько десятков нанометров, и они вполне могли бы быть использованы при разработке индентационного измерительного модуля, однако дискретность получаемых данных и громоздкость свойственной им измерительной системы заставили выбрать другой технический путь решения задач, возникающих при разработке экспериментального образца iPoRTH.

Ключевая особенность разрабатываемого индентационного модуля будет подробно описана в разделе 4, посвященном обоснованию его конструкции. В данном месте отметим только то обстоятельство, что принятое решение об оригинальной кинематической схеме прибора, в которой датчик, измеряющий заглублиение через относительное перемещение и контролирующий таким образом ход индентора именно по отношению к поверхности материала, является наиболее технологичным и наименее подверженным температурным воздействиям, свойственным работе в полевых и производственных условиях.

### **Результаты и выводы раздела**

Рассмотренные датчики перемещения позволяют сделать вывод о том, что наиболее целесообразно при выполнении ПНИЭР использовать именно емкостной тип преобразователя для измерения глубины погружения индентора в исследуемый материал и контроля уровня сжатия силовочувствительного элемента. Для модуля оперативного контроля вполне целесообразным является использование электромагнитного актюатора, но основе цилиндрической катушки помещенной в аксиально симметричное магнитное поле. Для экспериментального образца iPoRTH в качестве актюатора, обеспечивающего подвод индентационного модуля к поверхности материала и нагружения индентора более целесообразно будет использование актюатора в виде линейного транслятора, обеспечивающего требуемое для индентирования усилие при минимальной потребляемой мощности.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.3 ПГ и п.3.3 ТЗ.



#### 4 Выбор и обоснование наиболее перспективного и технологичного технического решения для реализации экспериментального образца iPoRTH

Исходя из опыта, имеющегося у разработчиков, результатов патентного поиска и материалов, полученных в ходе аналитического обзора мирового состояния дел в области контроля механических свойств конструкционных материалов, было принято решение о разработки iPoRTH в виде модульной конструкции, позволяющие легко адаптировать прибор для различных применений в заводских и полевых условиях, а также в составе роботизированных производственных линий.

Два основных модуля iPoRTH – индентационную измерительную головку и систему крепления и позиционирования измерительных модулей – предлагается сделать легко сопрягаемыми и допускающими быструю сборку и разборку на составные части без использования специального оборудования одним человеком.

В ходе решения данной задачи было рассмотрено несколько вариантов быстросъемного сопряжения: резьбовое соединение, когда измерительный модуль вкручивается в систему крепления и позиционирования, байонетное соединение, когда крепление осуществляется путем взаимного поворота на фиксированный угол, и обычное винтовое сопряжение, при котором четыре винта прижимают внешний фланец измерительного модуля к системе крепления.

Все три решения были признаны работоспособными, но в качестве рабочего выбран третий вариант как наиболее долговечный и максимально воспроизводимый по своим механическим характеристикам. Взаимная посадка двух сопрягаемых модулей по большой площади с контролируемым усилием прижима гарантирует высокое значение контактной жесткости и позволяет надеяться на минимальное влияние системы крепления на процесс инструментального индентирования.

Имеющийся у исполнителя опыт по разработке оборудования для измерения твердости и модуля Юнга указывает на исключительную важность итоговой жесткости системы крепления и позиционирования индентационных модулей и отсутствие каких-либо люфтов и гибких сочленений в составе измерительного комплекса.

Поскольку большая часть предполагаемых к тестированию объектов обладает магнитными свойствами, то в качестве базовой системы крепления была выбрана система крепления на основе управляемых магнитов. Сегодня выпускается широкий набор такого рода магнитных держателей, надежно закрепляющихся как на плоских, так и на цилиндрических заготовках. Таблица с типичными параметрами такого рода магнитных захватов приведена на рисунке 26. При этом использование двух таких устройств в составе модуля крепления и позиционирования позволяет обеспечить высокую симметрию схемы iPoRTH и ортогональность процесса индентирования. Исходя из данных аналитического обзора, такое решение достаточно часто используется импортными производителями оборудования для тестирования механических свойств механических конструкций и, судя по отзывам пользователей, является эффективным и удобным в эксплуатации.

### Для плоских грузов

Тип	Вес по SWL макс. кг	Толщина мин. мм	Длина макс. мм
MaxX 125	125	20	1000
MaxX 250	250	20	1500
MaxX 500	500	25	2000
MaxX 1000	1000	40	3000
MaxX 1500	1500	45	3000
MaxX 2000	2000	55	3000

### Для изделий круглого сечения

Тип	Вес по SWL макс. кг	Толщина мин. мм	Длина макс. мм	Диаметр макс. мм
MaxX 125	125	20	1000	300
MaxX 250	250	20	1500	300
MaxX 500	500	25	2000	400
MaxX 1000	1000	40	3000	450
MaxX 1500	1500	45	3000	500
MaxX 2000	2000	55	3000	600

Рисунок 26 – Технические характеристики магнитных захватов

Принцип приведения такого рода устройств в удерживающее состояние и внешний вид представлены на рисунке 27.

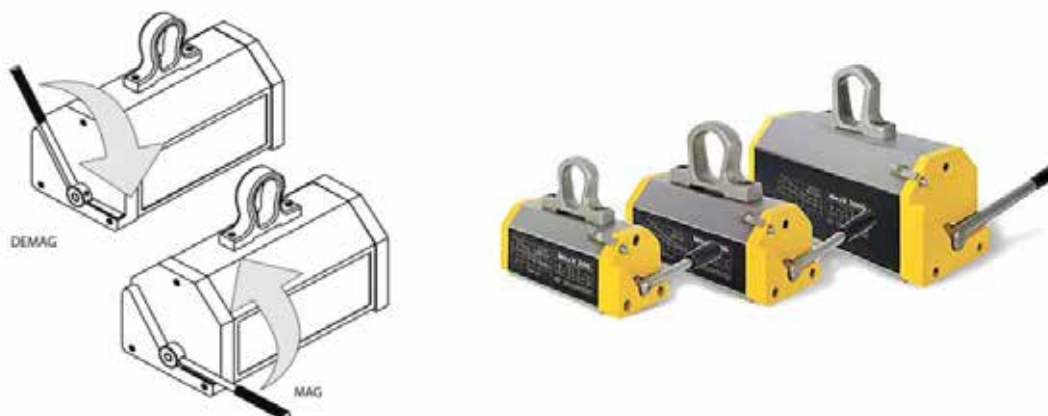
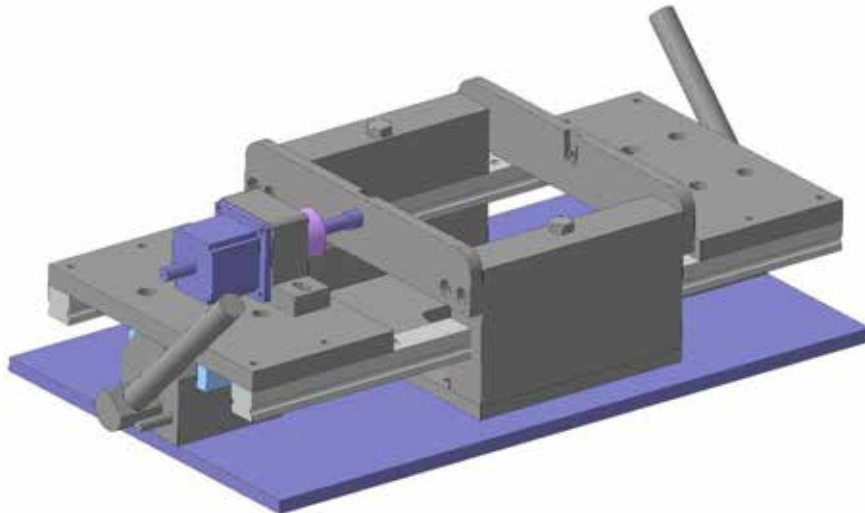


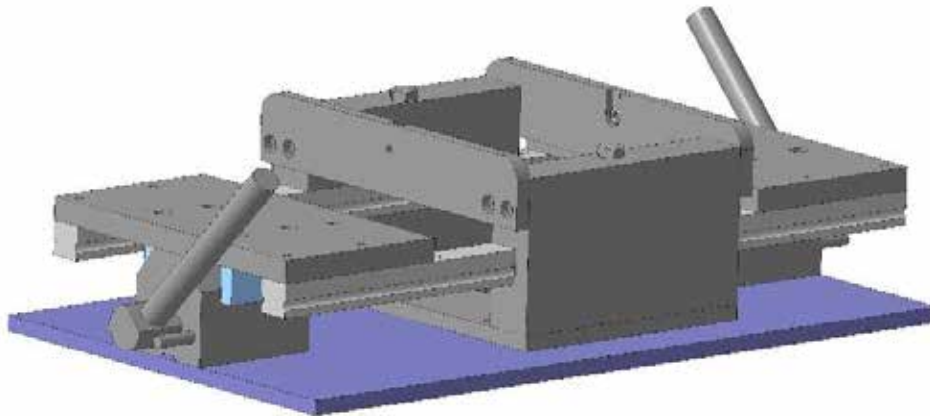
Рисунок 27 – Принцип приведения в рабочее состояние и внешний вид магнитных захватов

Поскольку разрабатываемый экспериментальный образец iPoRTH относится к категории роботизированного оборудования, выполняющего все измерительные процедуры в автоматическом режиме или под дистанционным управлением, то при разработке системы крепления и позиционирования была предусмотрена возможность дистанционного моторизированного перемещения измерительного индентационного модуля вдоль тестируемого изделия с помощью шагового двигателя, установленного на узле крепления.

Основная задача узла крепления и позиционирования – обеспечение жесткого контакта измерительного модуля с исследуемым изделием. При этом вид тестируемых изделий и образцов может существенно изменяться от одного потребителя к другому. Поэтому одной из особенностей выбранного технического решения является его дешевизна и легкая адаптируемость под различную форму изделий. В частности, в случае работы с немагнитными образцами функцию удерживающего магнита могут выполнять цепные и ременные захваты, активно используемые в промышленности. Именно по этим причинам (адаптируемость и дешевизна) модуль крепления и позиционирования выполнен по простейшей кинематической схеме, рисунок 28. Отличительной особенностью предложенного решения является возможность его реализации как в полностью автоматизированном, так и чисто ручном режиме работы. Это касается, как системы перемещения измерительных модулей, так и системы фиксации измерительного модуля в требуемом положении. На рисунке 28б представлена система с ручной фиксацией измерительного модуля в рабочем положении, но при необходимости вместо винтов могут быть установлены линейные актюаторы, обеспечивающие прижим подвижной платформы к направляющим рельсам (Рисунок 28а).



а)



б)

Рисунок 28 – Внешний вид моторизированного (а) и немоторизированного (б) модуля крепления и позиционирования

Расчет механических свойств системы крепления и позиционирования произведен в соответствующем разделе отчета, и он показал, что при требуемых по ТЗ усилиях индентирования упругая деформация системы позиционирования составляет десятки микрон и может достигать до 100 мкм при максимальном усилии – 3000 Н. Это обстоятельство и зависимость данного прогиба от вида используемого изделия исключает возможность построения измерительного модуля по кинематической схеме, использующей электромагнитные актюаторы для приложения силы, применяемые во многих традиционных твердомерах. Технология, при которой силозадающий элемент и измеритель перемещения расположены в едином корпусе и

осуществляют все измерения по отношению именно к этому корпусу, оказывается неработоспособной для условий использования iPoRTN. По этой причине в конструкцию индентационного модуля был введен элемент, позволяющий контролировать перемещение индентора по отношению именно к исследуемой поверхности.

Диапазон индентационных усилий, время проведения многоцикловых измерений и требования автономности и работоспособности от аккумуляторной батареи, исключают использование электромагнитной системы нагружения, поэтому в качестве силозадающего элемента было принято решение использовать моторизированный линейный механический актюатор, типа того, что изображен на рисунке 29.



Рисунок 29 – Моторизированный линейный актюатор

Благодаря высокому КПД использования самоблокирующейся винтовой передачи, такого рода актюаторы могут оставаться в произвольном по длине положении при полном отключении напряжения питания на управляющем длиной электродвигателе.

Рабочий ход таких актюаторов может быть выбран из широкого диапазона, и соответственно всегда можно найти актюатор, обеспечивающий как требуемое усилие при движении, так и нужный для подхода к поверхности тестируемого изделия рабочий ход, рисунок 30.

Technical specifications:

Power supply	Spindle pitch (mm)	Load max. Push or Pull (N)	Motor type	Speed at 0/ full load (mm/sec.)	Current at 0/ full load (Amp.)
12VDC	3	2500 / 2500	A: 12V	3.1 / 2.3	0.6 / 3.3
CBJ1/2, CBJH and CBJC	3	2500 / 2500	B: 24V	3.2 / 2.5	0.3 / 1.8
OpenBus™	3	2500 / 2500	G: 24V	3.2 / 2.7	0.2 / 1.2
12VDC	5	1800 / 1800	A: 12V	5.1 / 4.1	0.7 / 3.9
CBJ1/2, CBJH and CBJC	5	1800 / 1800	B: 24V	5.3 / 4.7	0.3 / 1.9
OpenBus™	5	1800 / 1800	G: 24V	5.4 / 4.8	0.2 / 1.3
12VDC	6	1500 / 1500	A: 12V	6.2 / 4.6	0.8 / 3.6
CBJ1/2, CBJH and CBJC	6	1500 / 1500	B: 24V	6.4 / 5.5	0.3 / 1.5
OpenBus™	6	1500 / 1500	G: 24V	6.3 / 5.5	0.2 / 1.1
12VDC	9	1200 / 1200	A: 12V	9.3 / 6.8	0.7 / 3.8
CBJ1/2, CBJH and CBJC	9	1200 / 1200	B: 24V	9.4 / 8.2	0.4 / 1.9
OpenBus™	9	1200 / 1200	G: 24V	9.2 / 8.2	0.2 / 1.1
12VDC	12	900 / 900	A: 12V	12.4 / 9.2	0.7 / 3.8
CBJ1/2, CBJH and CBJC	12	900 / 900	B: 24V	12.6 / 10.5	0.3 / 1.8
OpenBus™	12	900 / 900	G: 24V	12.6 / 10.3	0.2 / 1.3

Рисунок 30 – Типичные параметры линейных актюаторов

Такого рода актюаторы рассчитаны на многократное срабатывание и выдерживают десятки тысяч выдвигений на полный ход при полной нагрузке, что вполне соответствует требуемой по ТЗ наработке на отказ iPoRTH. Одной из особенностей традиционных линейных актюаторов является отсутствие возможности управления скоростью выдвигения штока и, как следствие, трудности в управлении характером движения штока. Кроме того, такой актюатор является крайне жесткой системой в направлении движения штока и не может быть использован в составе iPoRTH в качестве силозадающего элемента, без введения в состав модуля специальных упругих элементов, позволяющих преобразовать линейное перемещение штока актюатора на десятки мм в линейно нарастающую силу в диапазоне от 3 Н до 3000 Н.

Данная задача была решена путем упругого соединения актюатора с силоизмерительным модулем iPoRTH. При этом во время индентирования, выдвигаясь, актюатор упирается в пружины и обеспечивает сначала подвод силочувствительного модуля к исследуемой поверхности, а затем индентационное нагружение и разгрузку по требуемому временному закону.

Для обеспечения плавного хода индентора и реализации контролируемого по силе нагружения в состав измерительного модуля был введен упругий элемент, состоящий из четырех пружин. Изменяя жесткость данных пружин, можно легко, не изменяя остальную конструкцию iPoRTH, подстраивать характеристики прибора под свойства тестируемых материалов, рисунок 31.

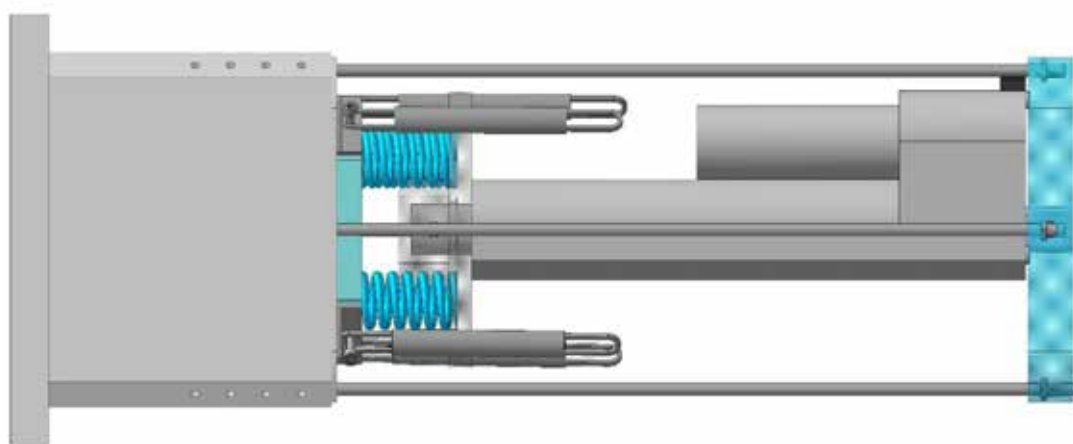


Рисунок 31 – Конструктивные элементы, обеспечивающие контролируемую развертку по силе в iPoRTH

Сегодня наряду со стальными трубами и элементами конструкции все чаще используются пластиковые трубопроводы и органические покрытия. При этом диапазон рабочих усилий при работе с пластиками должен быть на порядок меньше, чем при работе с металлами. В предлагаемой конструкции iPoRTH такая перестройка прибора под различные задачи может быть осуществлена простой заменой данных упругих элементов и сменой силочувствительного элемента, к описанию которого мы сейчас переходим.



Выбранная кинематическая и силовая схема iPoRTH предполагает не задание, а измерение усилия, возникающего в процессе индентирования. При этом силовочувствительный элемент состоит из двух плоских мембран, соединенных штоком со сменным индентором. Силовочувствительный элемент является монолитным изделием и не содержит в своей силовой схеме сварных, клеевых и винтовых сопряжений. Выбранный подход должен обеспечить максимальную стабильность, минимальную термочувствительность и безгистерезисность силовочувствительного элемента, рисунок 32.

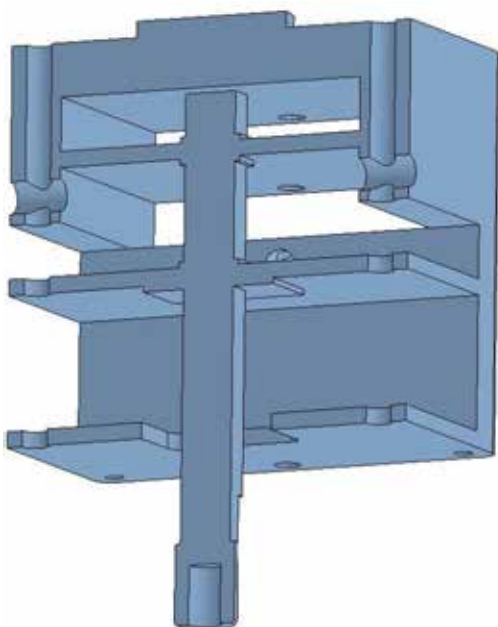


Рисунок 32 – Разрез силовочувствительного элемента iPoRTH

Поведение данного элемента при воздействии сжимающего усилия рассмотрено в разделе 5. Рассчитанные механические напряжения, возникающие в элементах конструкции при инструментальном индентировании с усилием 3000 Н, оказываются существенно меньше предельно допустимых для выбранных конструкционных материалов, а рабочий ход штока составляет сотни микрон, что вполне достаточно (при

условии регистрации данного перемещения с точностью лучше 10 нм) для обеспечения разрешения по силе не менее 0,1 Н.

Предложенная конструкция силовосчувствительного элемента будет оснащена емкостными датчиками, аналогичными используемым в традиционных нанотвердомерах и позволит контролировать интентационное усилие в динамическом диапазоне более 100 дБ ( $10^5$  раз).

Возможность изготовления силовосчувствительного элемента с различной толщиной рабочих мембран и из материалов с отличающимися модулями упругости (Юнга), позволит легко адаптировать iPoRTN для работы с различными материалами.

Данный силовосчувствительный элемент должен быть подведен к поверхности тестируемого образца, для этого он размещается в специальном внешнем корпусе, который по стальным направляющим может перемещаться в направлении поверхности, рисунок 33.

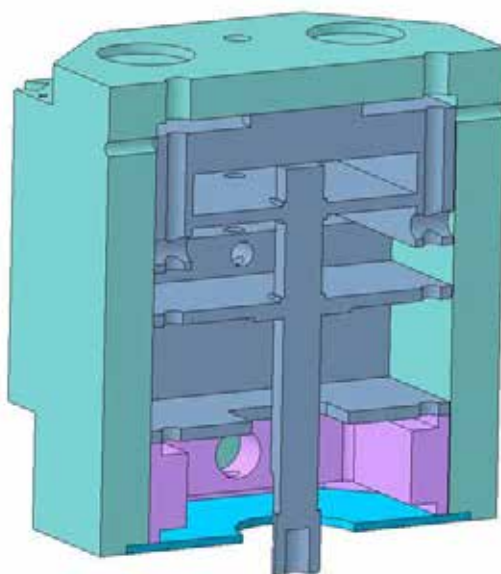


Рисунок 33 – Силовосчувствительный элемент внутри подвижного корпуса

Альтернативным методом решения задачи измерения силы могло быть использование разного рода промышленных силовосчувствительных

тензорезистивных элементов, традиционно используемых в импортных приборах, рисунок 34.



Рисунок 34 – Два характерных типа тензорезистивных силочувствительных элементов

Основным недостатком такого типа датчиков является температурный дрейф нуля и невоспроизводимость результата. При использовании такого рода преобразователей достаточно трудно обеспечить долговременную стабильность измерений в широком интервале температур, рисунок 35.

### Технические характеристики

Тип .....	тензодатчики
Вид .....	низкопрофильные на сжатие
Максимальный вес .....	500 кг
Повторяемость .....	0.05 %
Класс защиты .....	IP67
Рабочий коэффициент передачи .....	$2 \pm 0,005$ мВ/В
Диапазон значения нуля .....	$0 \pm 0,06$ мВ/В
Суммарная ошибка .....	0.15
Ползучесть (30 мин.) .....	0.03
Безопасная перегрузка .....	150

### Условия эксплуатации и стандарты

Температурный дрейф, %/10°C (нуля/сигнала) .....	0.05/0.1
Компенсруемый диапазон температур .....	-10°C ~ +40°C
Диапазон рабочих температур .....	-20°C ~ +80°C

Рисунок 35 – Типичные параметры тензорезистивного датчика

Итоговая суммарная погрешность такого рода датчика не может быть меньше (0,1-0,3) %, что не соответствует требованиям ТЗ, поэтому было принято решение разработать и изготовить оригинальную цельнометаллическую конструкцию силовослеpitельного элемента, интегрированную в состав iPoRTH. При этом изготавливаемая конструкция измерительного блока допускает установку традиционных тензорезистивных датчиков в iPoRTH и таким образом метрологические возможности разработанной конструкции могут быть расширены как в сторону больших, так и меньших рабочих нагрузок.

Как было указано выше, из-за существенной упругой деформации системы крепления индентационного измерительного модуля было принято

решение предусмотреть возможность контактного измерения перемещения индентора по отношению к исследуемой поверхности. Для этого предлагается использовать специальный составной наконечник с опорным элементом, обеспечивающим упругий контакт одной из обкладок емкостного измерительного преобразователя с поверхностью тестируемого изделия, рисунок 36.

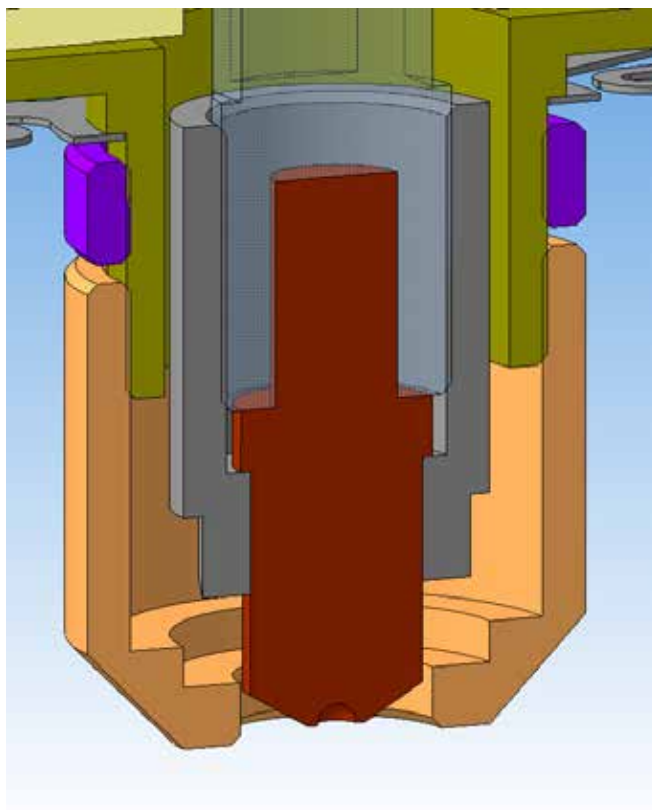


Рисунок 36 – Составной наконечник индентационного измерительного модуля

При осуществлении инструментального индентирования первичный упругий контакт с поверхностью происходит с защитным кольцевым сердечником, и только после обеспечения некоторого уровня прижима в контакт с поверхностью входит индентор со сферическим твердосплавным наконечником и начинается контролируемая пластическая деформация исследуемого материала. Принцип работы блока измерения глубины индентирования понятен из внутреннего устройства комбинированного модуля, измеряющего заглубление и силу прижима, рисунок 37.

При этом емкостной датчик измеряет именно относительное перемещение между обкладками, соединенными с рабочим штоком индентационного модуля и подвижным элементом, опирающимся на опорный элемент. Рабочий ход данного датчика перемещений определяется в первую очередь наблюдаемым при индентировании заглублением индентора. В тоже время этот зазор должен превышать свободный ход измерительного модуля между первым упругим контактом ограничивающего элемента и первым упругим контактом твердосплавного индентора с исследуемым материалом. Заложенная в конструкцию величина полного хода датчика перемещений составляет 2 мм, что, судя по опыту эксплуатации современных твердомеров, позволит осуществлять измерение перемещений с точностью не хуже 10 нм. Данный узел прецизионного измерения глубины погружения индентора в материал традиционно делают на основе емкостных датчиков перемещения. Альтернативными решениями могут быть разного рода оптические датчики, нониусные энкодеры и датчики на основе дифференциальных трансформаторов. При этом любой из обозначенных типов датчиков может быть использован для измерения рабочих перемещений iPoRTN в диапазоне от 10 нм до 100 мкм. Однако именно емкостная схема является наиболее технологичной и устойчивой к воздействию внешних факторов. Достигаемые пороговые значения регистрируемых в таких схемах смещений менее 1 нм указывают на перспективность использования именно такой измерительной схемы.

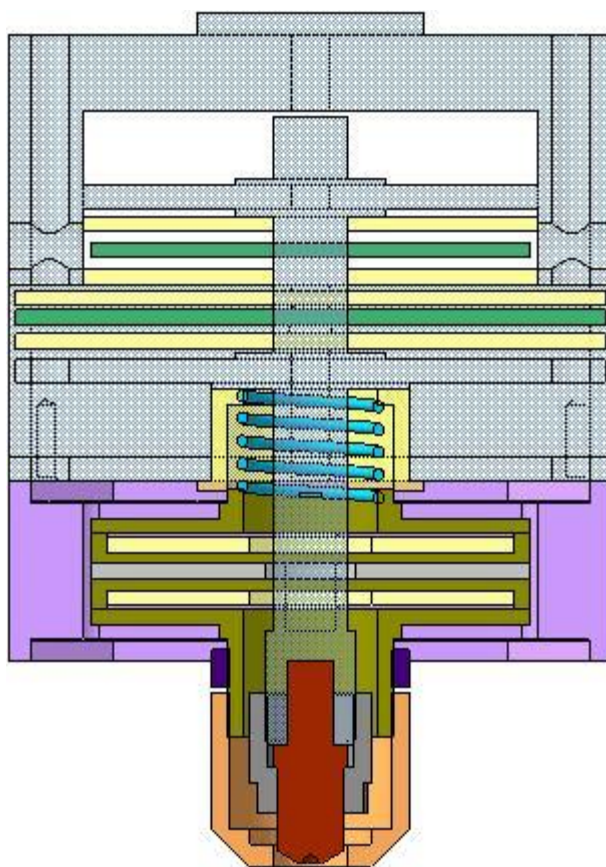


Рисунок 37 – Конструкция универсального измеряющего силу и заглубление модуля

Предложенное конструктивное решение позволяет исключить влияние упругой деформации системы крепления и корпуса самого индентационного модуля на диаграмму нагрузка-глубина и тем самым повысить достоверность получаемых методом инструментального индентирования данных о твердости, диаграмме напряжение-деформация и модуле Юнга тестируемого материала.

Предложенные технические решения органически ложатся в линейную конфигурацию измерительного индентационного модуля iPoRTH, представленную на рисунке 38.

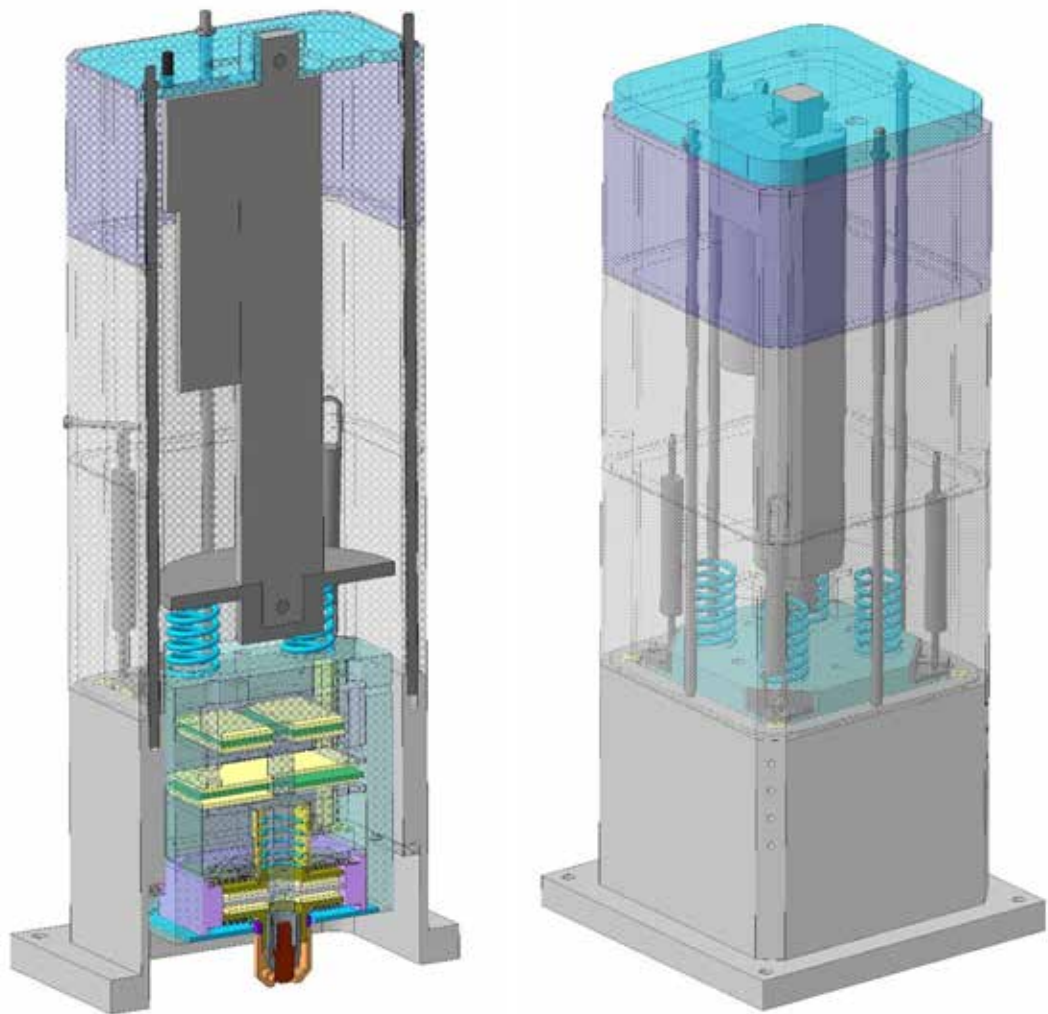


Рисунок 38 – Общая конфигурационная схема iPoRTH

Рассмотренные технические решения позволили сформировать следующую компоновочную схему iPoRTH при его расположении на плоской и цилиндрической поверхности, рисунок 39. Рассмотренные технические решения и подходы указывают на то, что реализация поставленной в ТЗ задачи предполагает широкий круг инженерных задач и разработку системы, состоящей из разнородных элементов актюирования и измерения, работающих с разнообразными сигналами.

Предложенное техническое решение исключает возможность разработки чисто аналоговой электроники iPoRTH и указывает на важность создания системы радиоэлектронного обеспечения, работающей в режиме реального времени. Таким образом удастся полностью реализовать широкие



возможности метода инструментального индентирования в плане изучения механических свойств конструкционных материалов.

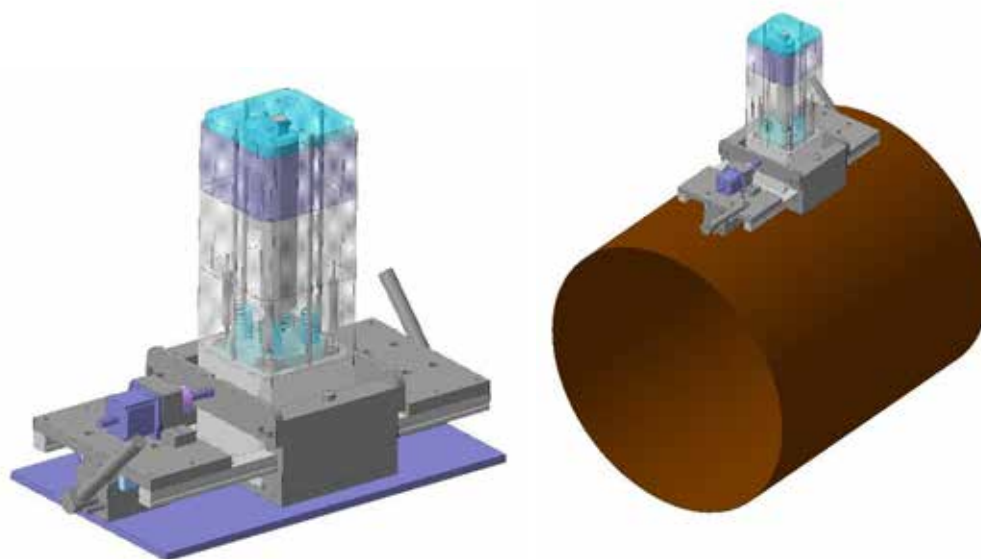


Рисунок 39 – Расположение iPoRTH на плоской и цилиндрической поверхностях

Проведенный анализ продемонстрировал возможность реализации различных технических решений поставленной в ТЗ задачи. Исходя из сравнительного анализа функциональных и метрологических возможностей разного рода актюаторов и датчиков, была сформирована конфигурация iPoRTH, принятая за основу при изготовлении экспериментального образца iPoRTH. Его подробное описание и обоснование конструктивных особенностей будет приведено в соответствующем разделе отчета.

### **Результаты и выводы раздела**

Анализ возможных путей решения поставленных в ТЗ на ПНИЭР задач позволил вычлнить наиболее перспективные технические решения пригодные для реализации iPoRTH и системы его крепления к магнитным образцам. Существенной особенностью разрабатываемого экспериментального образца стала монолитная конструкция силочувствительного элемента, использование опорного кольца при

измерении глубины погружения индентора и использовании парного дифференциального емкостного датчика для измерения силы и глубины во время инструментального индентирования.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.4 ПГ и п.3.4 ТЗ.

## 5 Результаты расчета конструкции: аналитического и численного моделирования основных узлов разрабатываемого прибора

Работы данного раздела выполнены Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

В рамках выполняемой работы согласно пункту 4.3.1.1.1 ТЗ экспериментальный образец iPoRTN состоит из следующих модулей:

- индентационный измерительный модуль
- измерительный модуль оперативного контроля;
- цифровой оптический микроскоп;
- оптический конфокальный профилометр;
- система крепления и позиционирования измерительных модулей;
- электронный блок управления;
- вычислительный блок сбора и обработки данных;
- система электропитания;
- аккумуляторная батарея;
- комплект тестовых образцов твердости и/или шероховатости;
- модуль беспроводной цифровой связи;
- управляющее программное обеспечение;

Индентационный измерительный модуль разрабатывается на данном, первом этапе работы и его расчет его элементов будет представлен ниже. Измерительный модуль оперативного контроля согласно ПГ будет разрабатываться на втором этапе работ, поэтому его моделирование на данном этапе не проводится. Цифровой оптический микроскоп, а также оптический конфокальный профилометр являются сторонними законченными изделиями, интегрируемым в общую конструкцию iPoRTN и в связи с тем, что они являются законченными изделиями, расчета не требуют, такое же замечание относится к таким стандартным элементам, как

аккумуляторная батарея. Система крепления и позиционирования измерительных модулей разрабатывается в рамках данного этапа, и ее расчет будет представлен ниже. Моделирование электронной схемы управления измерительным модулем, вычислительного блока обработки данных, схемы электропитания и модуля беспроводной цифровой связи будет представлено в соответствующем разделе настоящего отчета. Таким образом, в данном разделе отчета будет представлено моделирование индентационного измерительного модуля, а также системы крепления и позиционирования измерительных модулей.

Вид разреза индентационного измерительного модуля представлен на рисунке 40.

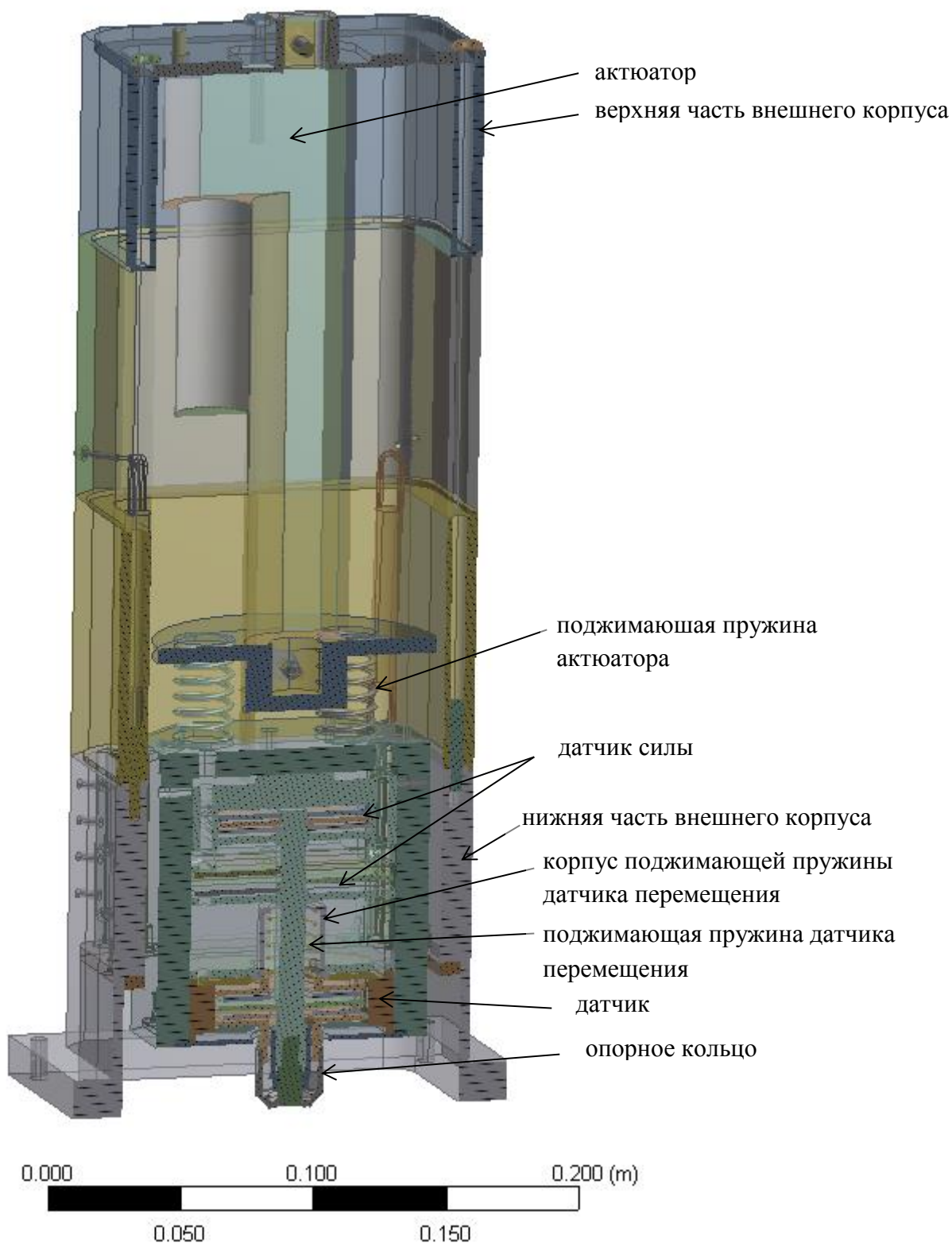


Рисунок 40 – Вид индентационного измерительного модуля в разрезе

Ключевыми элементами конструкции являются датчики перемещения и силы (приложенной нагрузки). Для обоих элементов важно удостовериться в том, что в диапазоне прикладываемых нагрузок их функционирование происходит в упругом режиме, предел текучести не достигается, и

разрушения данных элементов не происходит. Датчик силы измеряет силу взаимодействия с образцом путем умножения перемещения его упругих элементов (мембран) на соответствующее значение жесткости. Естественно, что данное значение жесткости является не постоянной величиной, учет нелинейности которой является трудным с практической точки зрения, в связи с тем требуется получить значение жесткости, а также степень ее нелинейности. Для датчика перемещения нелинейность не является значительной, однако также была рассчитана для полноты описания элемента.

Кроме того, был произведен расчет элемента корпуса, обладающего пониженной толщиной стенок, целью данного расчета является исследование прочности элемента, а также степени возникающей деформации.

Также был произведен расчет системы крепления и позиционирования образца, целью которого также является определение прочности конструкции, а также возникающих в ней деформаций.

### 5.1 Расчет корпуса датчика силы индентационного измерительного модуля

Корпус датчика силы изготавливается в виде цельного монолитного элемента, содержащего две упругие области, обладающие пониженной жесткостью, работающие аналогично мембранам. Именно на этих мембранах предполагается закрепление обкладок конденсатора, с помощью которых будет производиться измерение деформации, которая при умножении на жесткость конструкции позволит вычислить приложенную силу.

Численное моделирование проводится для определения прочности конструкции, а также для определения линейности изгиба мембранных элементов при приложении нагрузки. Конструкция считается достаточно прочной, если при приложении определенных требованиями ТЗ нагрузок (3кН) напряжение Фон-Мизеса не превышает предела текучести материала. Степень линейности определяется по отношению отклонения перемещения

центральной области мембран от линейной зависимости к общему перемещению.

Моделирование проводилось методом конечных элементов. Решалась статическая задача, время в данном случае использовалось просто в качестве параметра, определяющего последовательность точек, в которых была задана сила. В качестве материала корпуса был использован алюминий с заданным модулем Юнга 70 ГПа и коэффициентом Пуассона 0.3. Для изготовления конструкции планируется использовать дюралюминий Д16Т или аналогичный. Практически все алюминиевые сплавы обладают указанным выше модулем Юнга и коэффициентом Пуассона, принципиально различаясь по поведению в пластической области. В силу того, что расчет производится для упругой модели, и пластика является недопустимой при работе прибора, указанных величин достаточно для расчета. Разбиение корпуса на конечные элементы, а также места закрепления конструкции и приложения нагрузки приведены на рисунке 41. Также на рисунке обозначены элементы, названные «верхняя мембрана» и «нижняя мембрана».

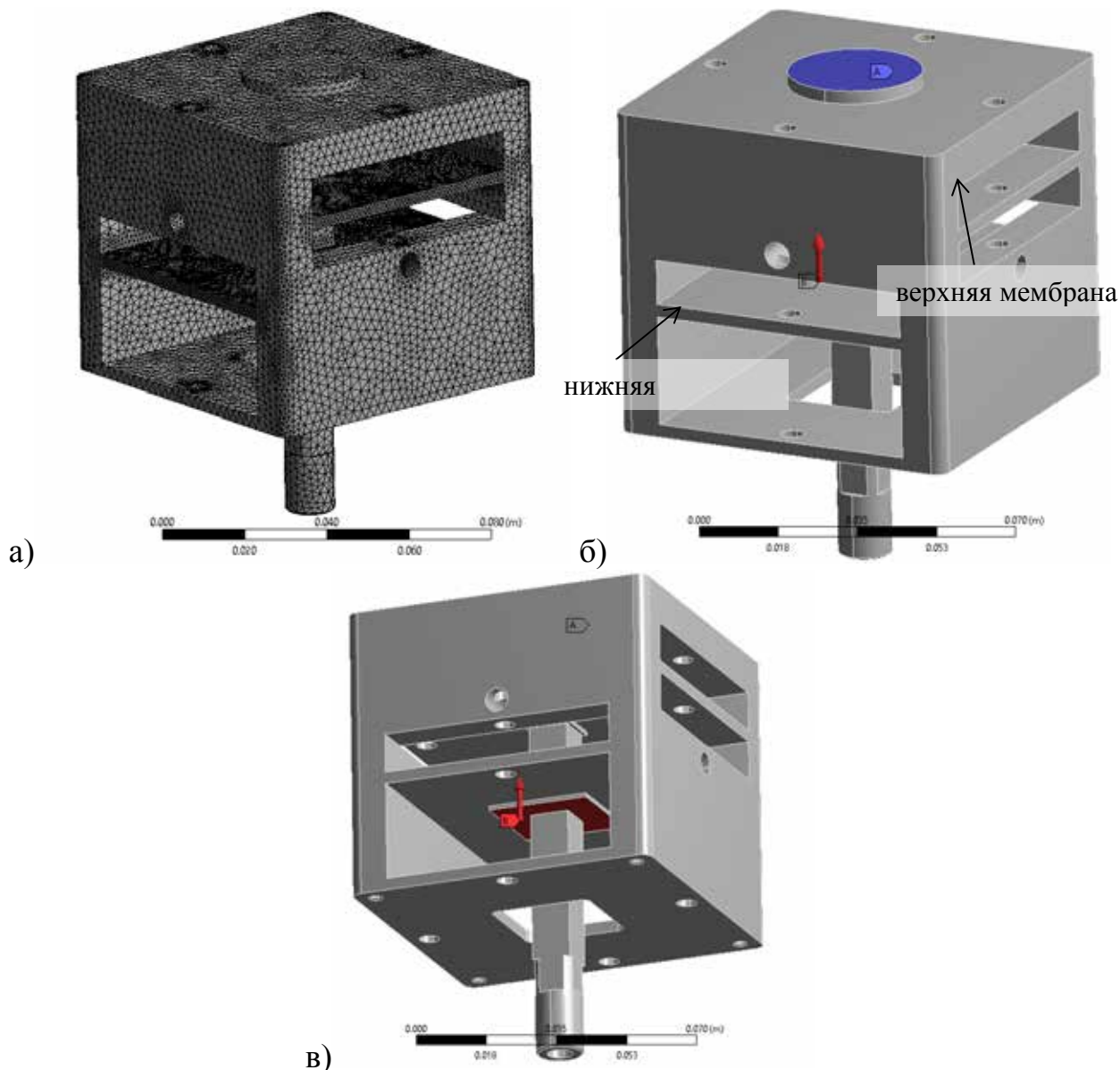


Рисунок 41 – а) разбиение конструкции на конечные элементы; б) место жесткого закрепления конструкции (на рисунке обозначенно синим цветом и буквой А), в) место приложения нагрузки (на рисунке обозначенно красной стрелкой и буквой В)

Зависимость приложенной силы от времени представлена на рисунке 42. Еще раз заметим, что весь процесс был квазистатическим, и в каждый момент времени решалось статическое уравнение.



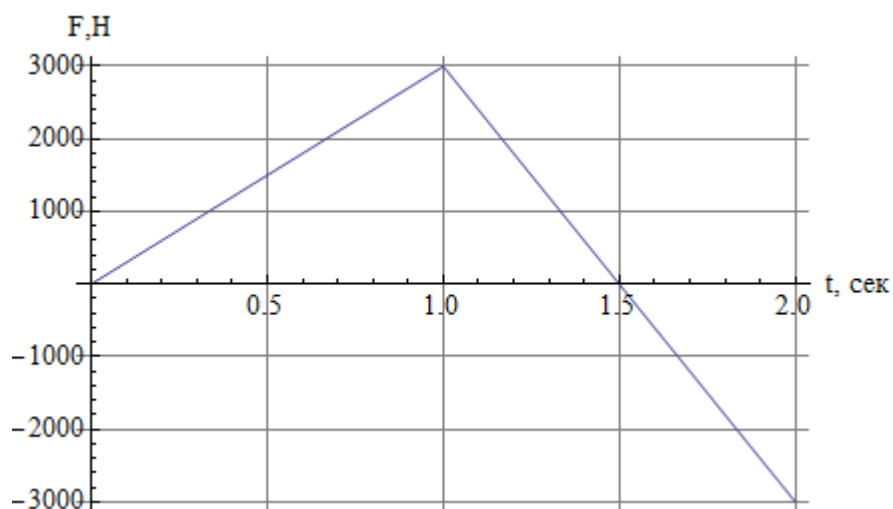


Рисунок 42 – Зависимость приложенной силы от времени

В результате максимальные напряжения, полученные в моменты времени 1, с и 2, с, отвечающие нагрузкам **3000 Н** и **-3000 Н** составили 157.8 МПа и 155.8 МПа (рисунок 43), что в несколько раз меньше предела текучести сплава Д16Т, составляющего величину порядка 450 МПа.

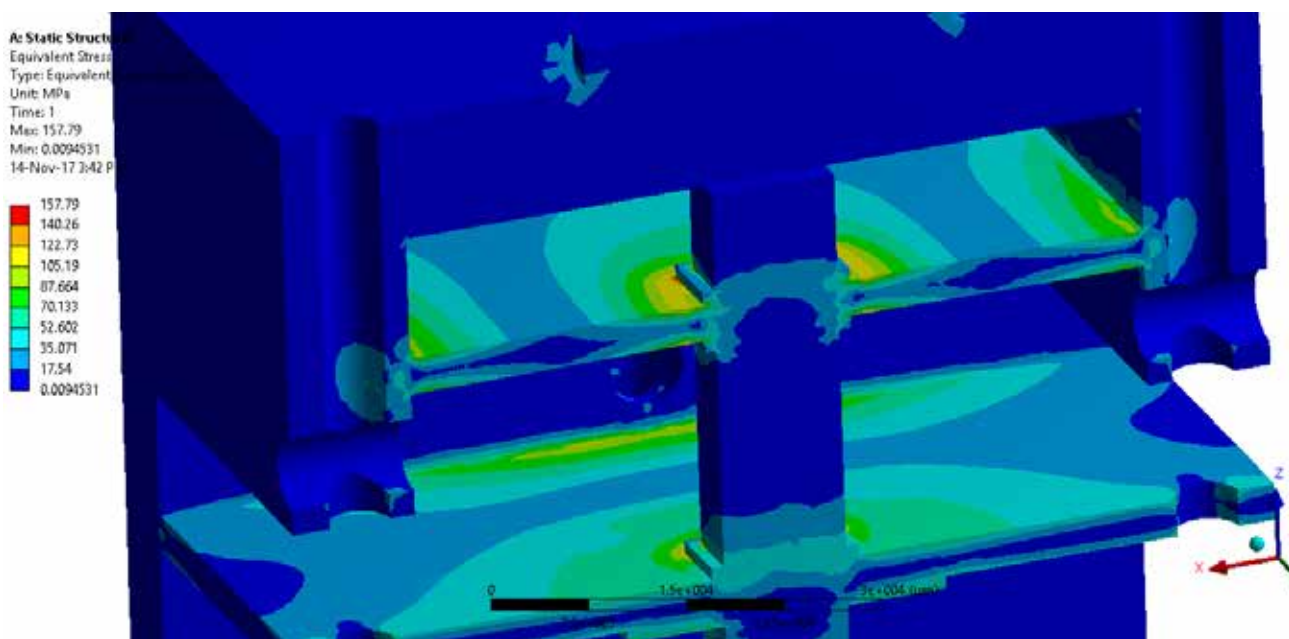


Рисунок 43 – Распределение напряжений Фон-Мизеса при приложении нагрузки 3000Н

Соответствующее распределение деформаций представлено на рисунке 44. Максимальное значение деформации составляет 194 мкм, деформация в области мембран: ~160 мкм, что составляет достаточную величину для регистрации подобных перемещений емкостным способом. Таким образом, верхний и нижний подвижные упругие элементы (мембраны)

могут использоваться для закрепления пластин и создания конденсатора, регистрирующего перемещения и с учетом жесткости конструкции – для вычисления приложенной силы.

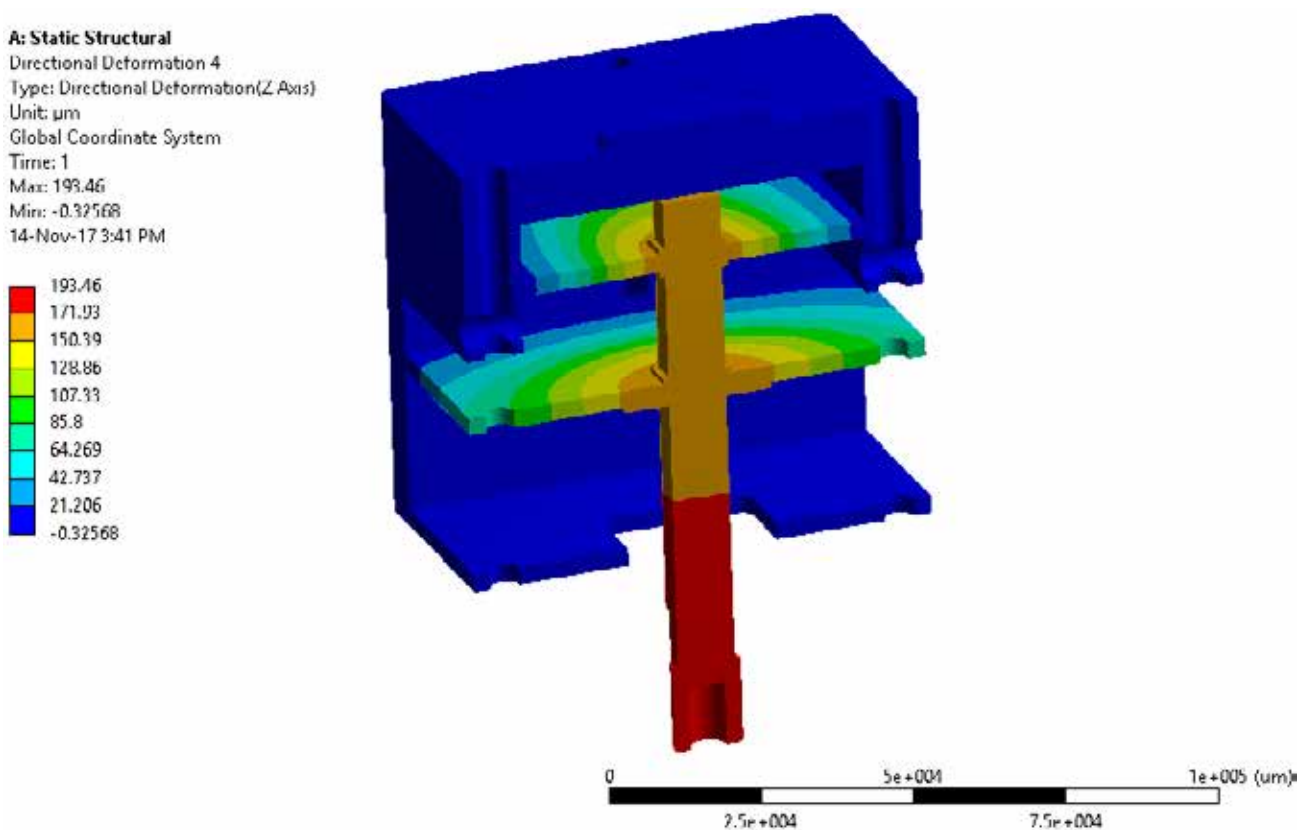


Рисунок 44 – Распределение смещений по оси Z при приложении нагрузки 3000Н

Помимо максимального диапазона перемещений также была определена степень линейности конструкции. Были рассмотрены зависимости перемещения от приложенной нагрузки для точек, представленных на рисунке 45. Данные перемещения практически соответствуют перемещениям центральных частей верхней и нижней мембран. Полученные для данных точек значения перемещений  $Z$  в зависимости от приложенной силы  $F$  представлены на рисунке 46. Как видно из данного рисунка, жесткость, определенная по верхней точке является больше жесткости, определенной по нижней точке аппроксимации методом наименьших квадратов дает значение жесткости 19.17 МН/м для верхней точки и 18.73 МН/м для нижней точки. В дальнейшем в тексте данные жесткости связываются с жесткостями верхней и нижней мембран, хотя,

конечно же, жесткость самих пластин является одинаковой, различие обусловлено наличием между ними элемента штока, который также деформируется под нагрузкой. Если сформировать на основе верхней и нижней мембран два емкостных датчика с параллельным включением, то при помощи калибровки можно будет определить эффективное значение жесткости, которое будет соответствовать совокупной деформации двух мембран и части штока между ними. Величина методической ошибки будет определяться нелинейностью конструкции, которая рассмотрена ниже.

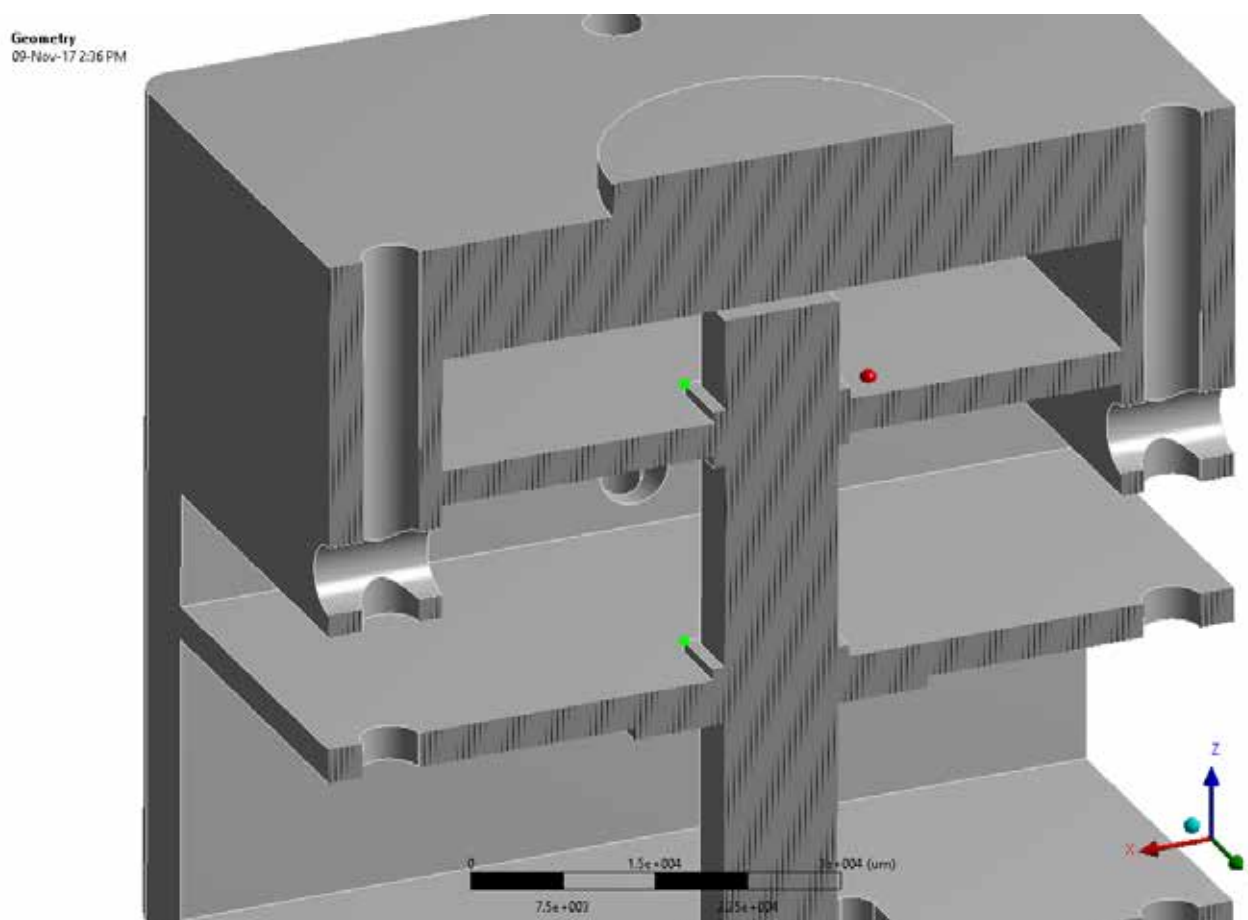


Рисунок 45 – Выбор точек для определения нелинейности жесткости конструкции

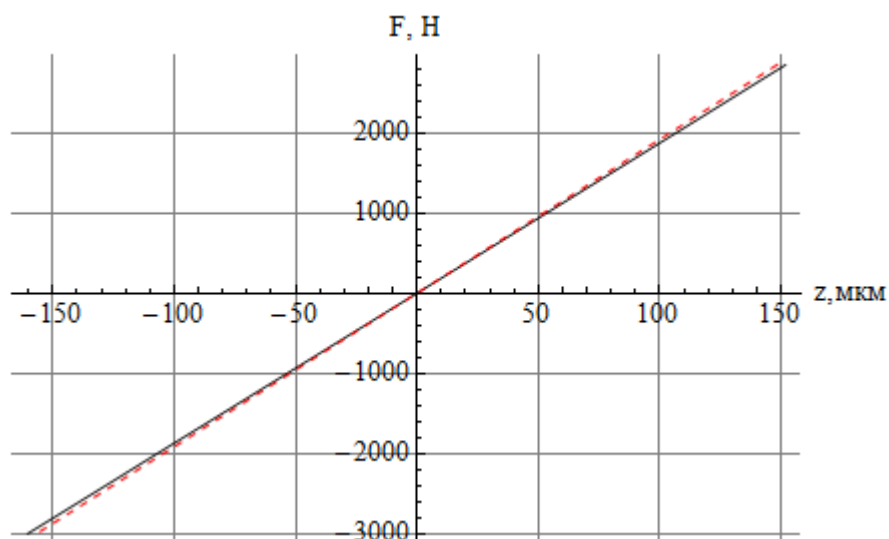


Рисунок 46 – Зависимость приложенной силы от перемещения для представленных на рисунке 45 верхней (красная пунктирная линия) и нижней (черная сплошная линия) точек

Исходя из зависимостей рисунка 46, можно отметить, что их отклонение от прямой линии весьма мало: соответствующая поправка, полученная после вычитания прямой линии, представлена на рисунке 47.

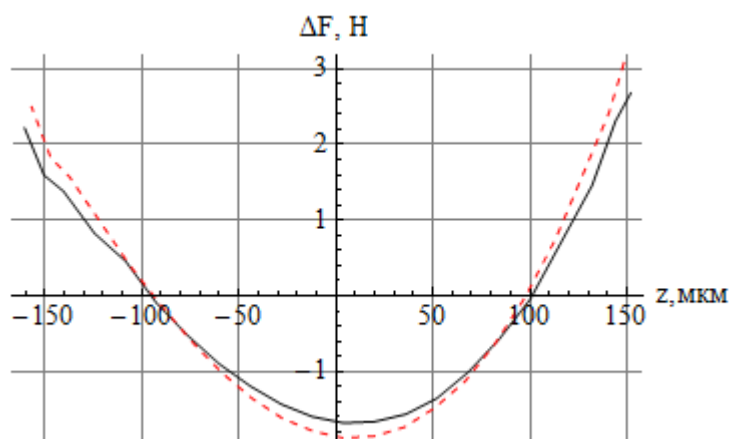


Рисунок 47 – Отклонение от линейности зависимостей, представленных на рисунке 46

Как видно из рисунка 47, следующим приближением после линейной зависимости  $F(h)$  является квадратичная зависимость. При соответствующей аппроксимации зависимостей рисунка 47 параболой и вычисления жесткости по формуле  $S = dF/dz$  зависимость жесткости от перемещения имеет вид, представленный на рисунке 48 .

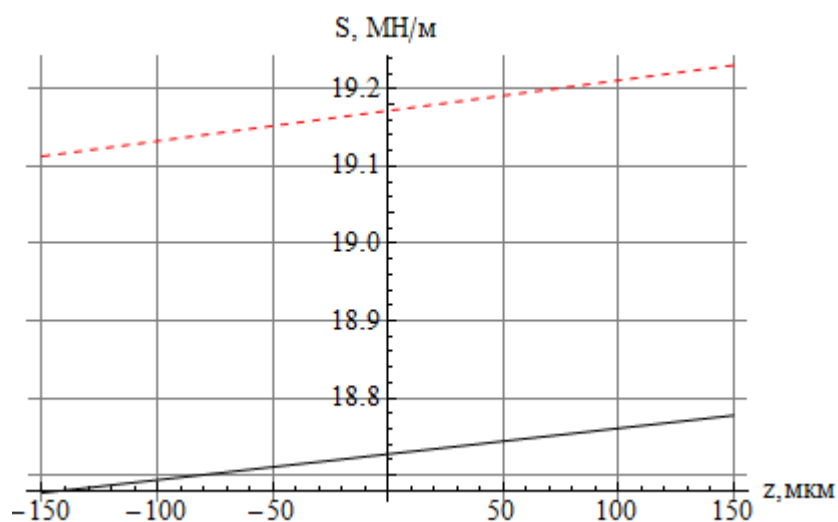


Рисунок 48 – Зависимость жесткости от перемещения для центральной области мембран: верхней (красная пунктирная линия) и нижней (черная сплошная линия)

Как видно из рисунка 48, относительное изменение жесткости мембран в диапазоне от 0 до 150 мкм составляет порядка  $\pm 0.15\%$ , если в качестве референсного значения выбрать жесткость при смещении  $z = 75$  мкм. Данное обстоятельство указывает возможность использования данной конструкции в качестве датчика силы, просто учитывая постоянную составляющую жесткости.

В качестве дополнения можно привести рассмотрение деформации штока. Соответствующее распределение деформаций при нагрузке 3000Н представлено на рисунке 49.

### A: Static Structural

Directional Deformation 5  
Type: Directional Deformation(Z Axis)  
Unit:  $\mu\text{m}$   
Global Coordinate System  
Time: 1  
Max: 193.46  
Min: -0.32568  
14-Nov-17 3:52 PM

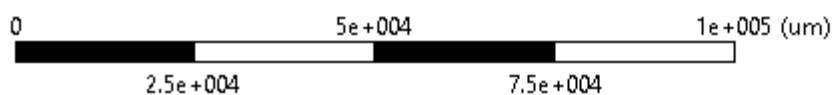
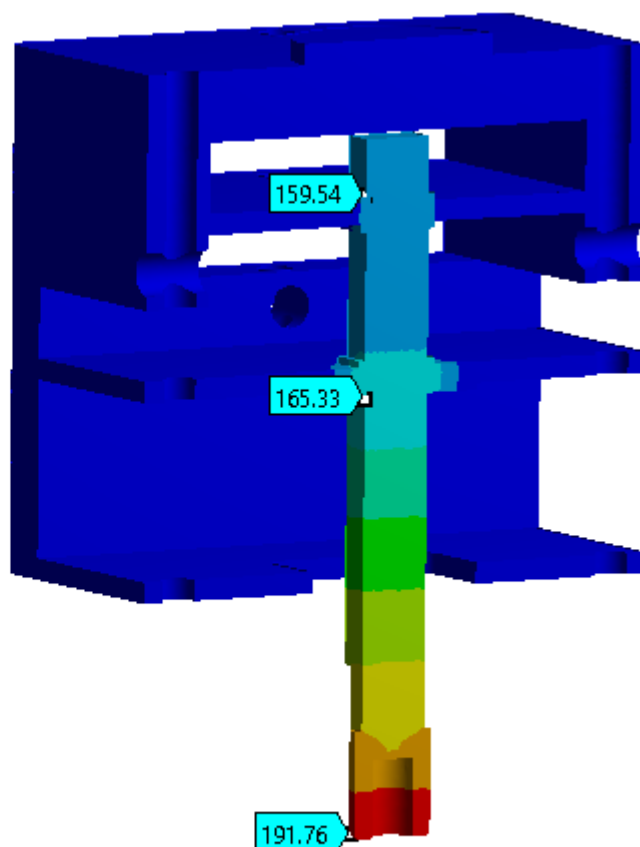
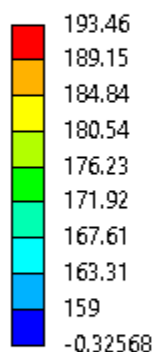


Рисунок 49 – Распределение смещений по оси Z при приложении нагрузки 3000 Н к алюминиевой конструкции, диапазон цвета оптимизирован для отображения деформации штока

Из данного рисунка видно, что деформация штока до области мембран составляет  $\sim 27$  мкм, в области мембран шток сжимается еще на  $\sim 6$  мкм. Итоговое значение жесткости конструкции будет определяться в процессе калибровки, например при помощи весов, подвешивания грузов, или с применением иного устройства, позволяющего измерить силу. Определенная таким образом жесткость будет соответствовать не только жесткости мембран, но и также будет учитывать включенную с ними последовательно жесткость штока. Учитывая, что деформация штока составляет  $\sim 20\%$  общей деформации, даже при полном соответствии свойств используемого в расчете и реального материала для изготовления конструкции, итоговое значение жесткости уменьшится на 20% и составит  $\sim 15.7$  МН/м.

В качестве альтернативного варианта была рассмотрена конструкция из стали (модуль Юнга 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3), геометрия конструкции была аналогична представленной на рисунке 41, с различием в том, что толщина верхней и нижней мембран составила не 3 мм, а 2 мм. Максимальный диапазон перемещения такой конструкции составляет 156 мкм, что практически совпадает с аналогичной величиной для конструкции из алюминия с более толстыми мембранами. Максимальное значение напряжений Фон-Мизеса составляет 372 МПа (рисунок 50), что в несколько больше, чем аналогичное напряжение для алюминиевой конструкции, что вполне ожидаемо, учитывая различие материалов в их значениях модуля упругости.

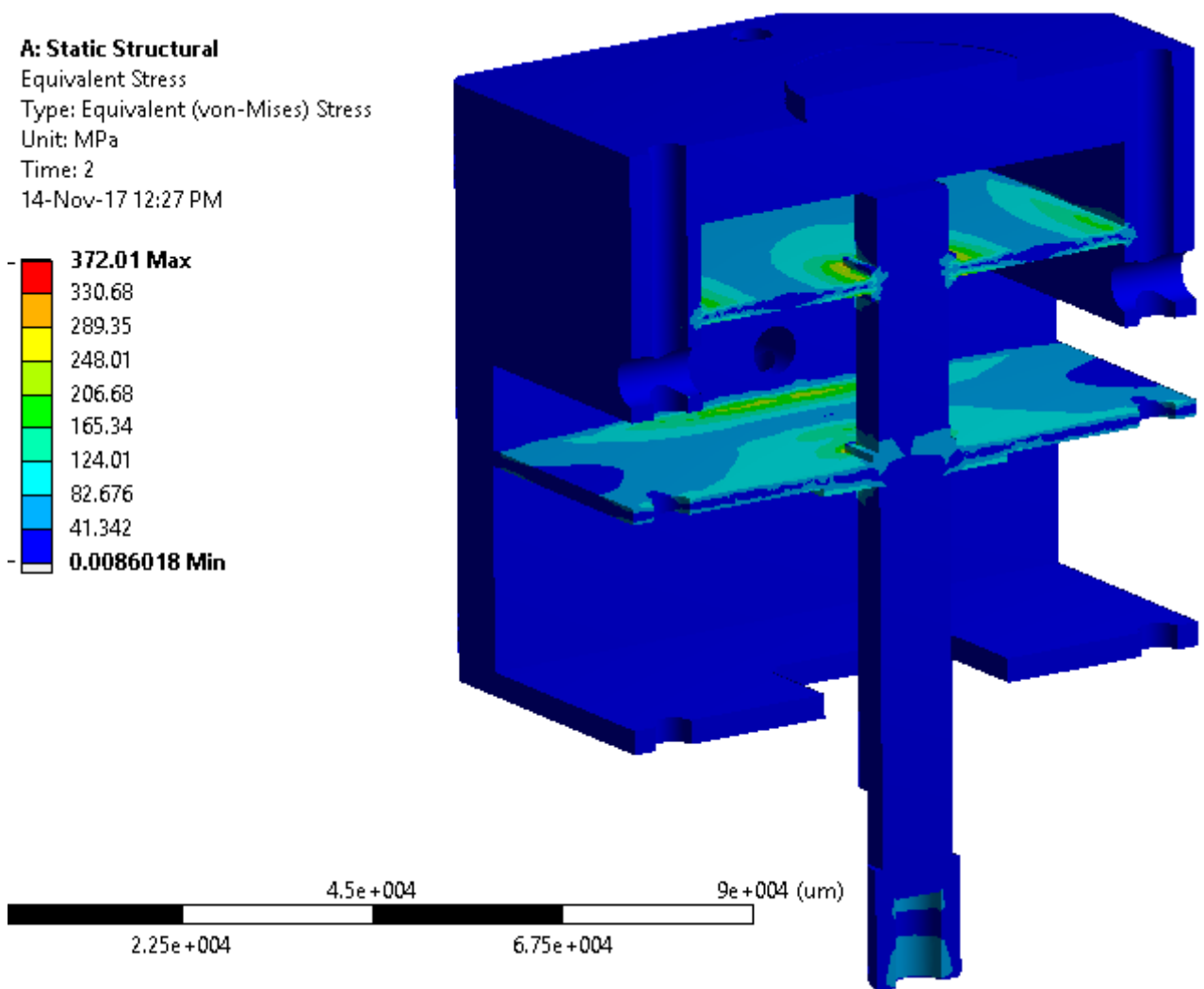


Рисунок 50 – Напряжения Фон-Мизеса в стальной конструкции корпуса датчика силы с уменьшенной толщиной мембран (нагрузка 3000 Н)

Для определения жесткости конструкции были выбраны те же точки, как и для случая конструкции, разработанной из алюминия (рисунок 45) зависимость приложенной к нижней части штока силы перемещения данных точек приведено на рисунке 51.



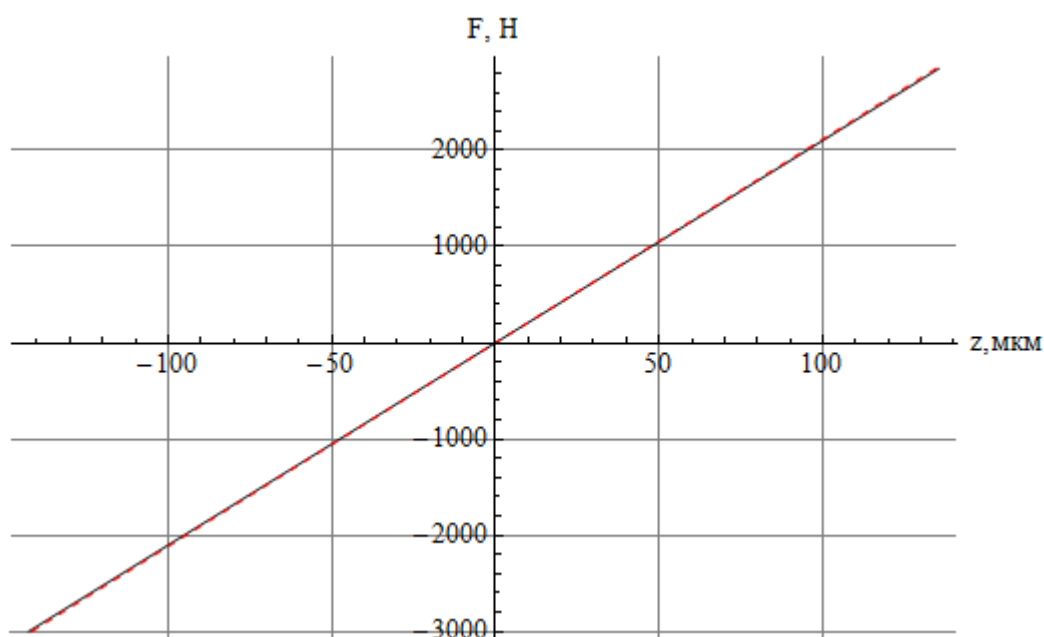


Рисунок 51 – Зависимость приложенной силы от перемещения для представленных на рисунке 45 верхней (красная пунктирная линия) и нижней (черная сплошная линия) точек для стальной конструкции с мембранами уменьшенной толщины

Средние жесткости высчитаны по перемещению верхней и нижней точек составляют 21.17 МН/м и 21.03 МН/м. Однако, в отличие от случая трехмиллиметровых мембран, изготовленных из алюминия, вычитание прямой линии из зависимостей рисунка 51 приводит к кривой не квадратичного, а кубического вида (рисунке 52). Такое поведение можно связать с тем, что диапазон перемещения мембран становится ближе к их толщине.

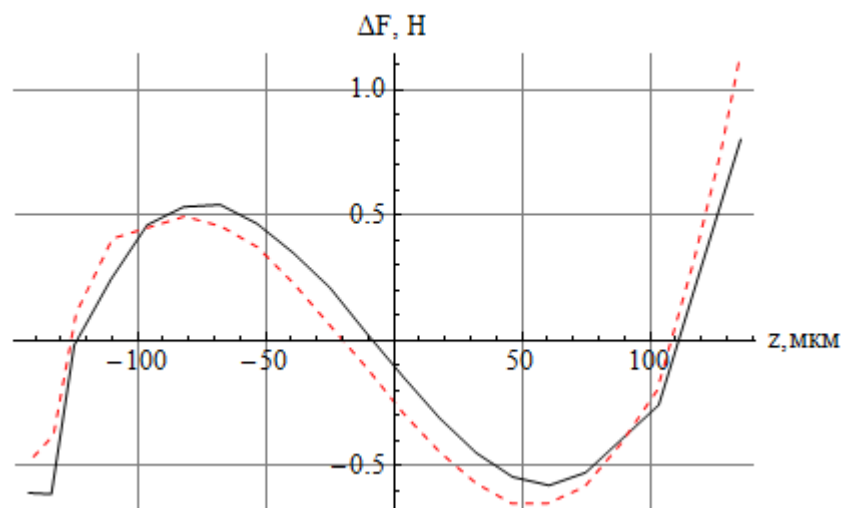


Рисунок 52 – Отклонение от линейности зависимостей, представленных на рисунке 51

Аппроксимируя зависимости рисунка 52 полиномом третьей степени и рассчитывая жесткость по формуле  $S = dF/dz$ , можно получить зависимости, представленные на рисунке 53.

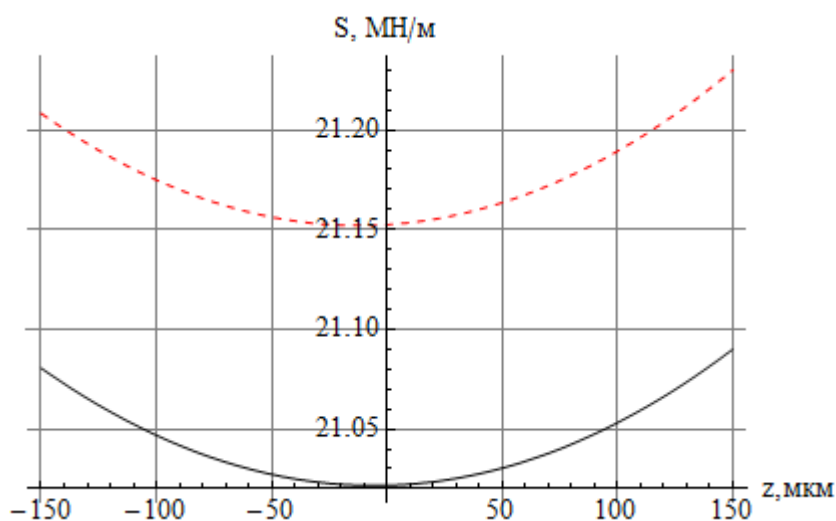


Рисунок 53 – Зависимость жесткости от перемещения для центральной области мембран: верхней (красная пунктирная линия) и нижней (черная сплошная линия) для стальной конструкции с мембранами уменьшенной толщины

Зависимости рисунка 53 показывают, что, несмотря на то, что форма нелинейности поменялась, диапазон изменения жесткости составляет  $\pm 0.2\%$ , если в качестве референсного значения выбрать значение жесткости при  $z=110$  мкм. При сходстве характеристик алюминиевой и стальной конструкции, можно отметить, что у них есть свои преимущества. Алюминиевая конструкция обладает в  $\sim 3$  раза меньшим весом, в то время как

стальная конструкция обладает повышенной жесткостью штока. Последнее обстоятельство приводит к тому, что деформация штока до области мембран составляет  $\sim 10$  мкм и в области мембран  $\sim 2$  мкм (рисунок 54), что, как и следует ожидать (исходя их соотношения модулей Юнга), округленно в 3 раза меньше, чем такое же значение для деформации алюминиевой конструкции.

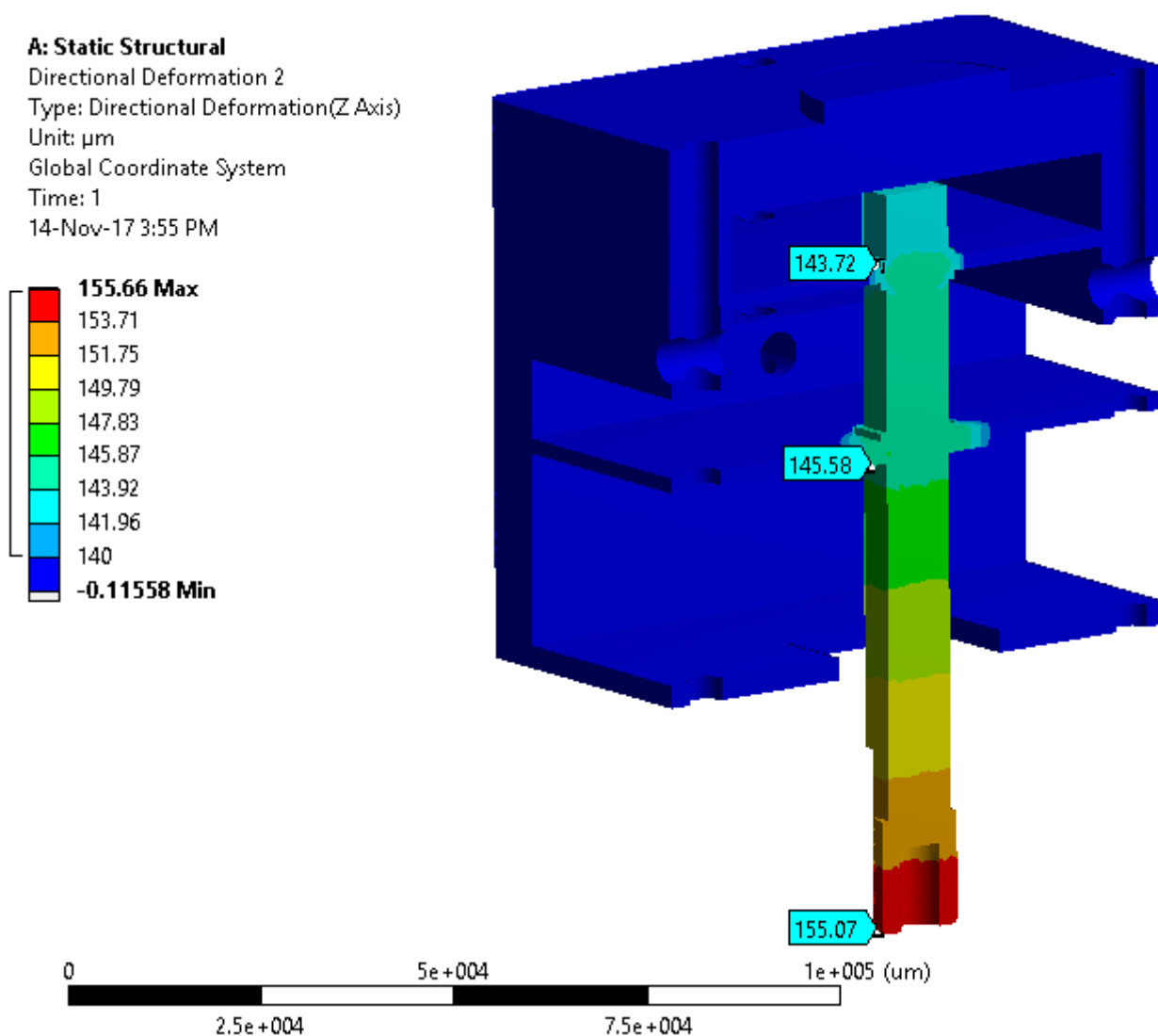


Рисунок 54 – Распределение смещений вдоль оси Z при приложении нагрузки 3000 Н к стальной конструкции, диапазон цвета оптимизирован для отображения деформации штока

Полученные результаты расчета указывают на возможность изготовления датчиков силы как из алюминия при толщине мембран 3 мм, так и из стали при толщине мембран 2 мм. В обоих рассмотренных случаях нелинейности конструкции находятся в диапазоне меньше половины

процента, а максимальные напряжения не превышают предела текучести прочных алюминиевых и стальных сплавов (например, сплавов Д16Т и 40Х13).

## 5.2 Аналитический расчет датчиков силы

Менее точное, однако, более наглядное и полезное с точки зрения рассмотрения возможности адаптации конструкции, решение можно получить, основываясь на аналитическом расчете для балки с двумя закрепленными краями (рисунок 55).

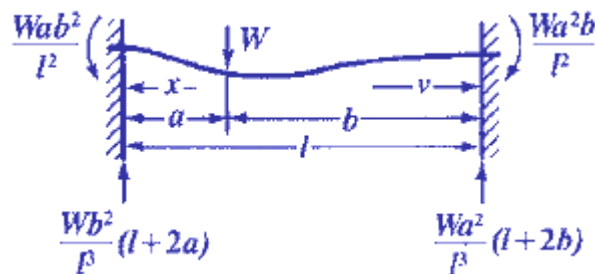


Рисунок 55 – К описанию задачи о деформации балки с двумя закрепленными краями [93,94]

Известно, что деформация [93,94] такой конструкции при  $x < a$  описывается уравнением:

$$y = \frac{Wx^2b^2}{6EI^3} (2a(l-x) + l(a-x)), \quad (39)$$

где  $I$  – момент инерции, который для балки толщиной  $t$  и шириной  $w$  равен:

$$I = t^3w/12. \quad (40)$$

В случае если сила приложена в центре балки ( $a = l/2$ ), соответствующая деформация при  $x = l/2$  имеет вид:

$$y_{max} = \frac{wl^2}{192EI}. \quad (41)$$

Подставляя выражение для момента инерции (40) можно получить:

$$y_{max} = \frac{wl^3}{16Et^3w}. \quad (42)$$

Соответствующее выражение для жесткости имеет вид

$$k_m = \frac{16Et^3w}{l^3}. \quad (43)$$

Учитывая размеры пластины  $w=80$  мм,  $l=60$  мм, можно получить значение жесткости  $k_m = 11.2$  МН/м в случае алюминия ( $E=70$  ГПа,  $t=3$ мм) и  $k_m = 9$  МН/м в случае стали ( $E=200$  ГПа,  $t=2$ мм). Естественно, что в случае двух параллельно соединенных мембран данные значения жесткости удвоятся и составят  $22.4$  МН/м и  $18$  МН/м, что практически точно совпадает с данными, представленными на рисунке 48 и 53. Завышенное значение аналитически рассчитанной жесткости для стальных пластин можно связать с тем большим значением деформации ( $400$  мкм).

В дополнение к зависимостям для жесткости можно привести выражение для максимального напряжения. При  $a = b = l/2$  для конструкции, изображенной на рисунке 55, данная величина составляет

$$\sigma_{max} = \frac{wl}{8Z}, \quad (44)$$

где  $Z$  – момент сопротивления поперечного сечения, равный

$$Z = \frac{wt^2}{6}. \quad (45)$$

Подстановка выражения (45) в формулу (44) приводит к выражению

$$\sigma_{max} = \frac{3wl}{4wt^2}. \quad (46)$$

Для стальной конструкции (с  $t = 2$  мм) данная величина составляет  $422$  МПа, для алюминиевой конструкции (с  $t = 3$  мм):  $188$  МПа, что близко к величинам, представленным на рисунке 43 и рисунке 50. Различия в максимальных значениях помимо численных эффектов также можно связать

с тем, что геометрия, рассмотренная аналитически, все-таки отличается от реальной конструкции.

Возвращаясь к определению жесткости конструкции, заметим, что исходя из зависимости (43), а также из рисунка геометрии 43, можно составить кинематическую схему датчика силы, которая представлена на рисунке 56. Элементы массы в конструкцию не включены, так как, например, сила тяжести, обусловленная массой штока, составляет  $\sim 0.8$  Н, что существенно меньше прикладываемых нагрузок (до 3000 Н), а динамическое поведение в рамках данной конструкции не рассматривается.

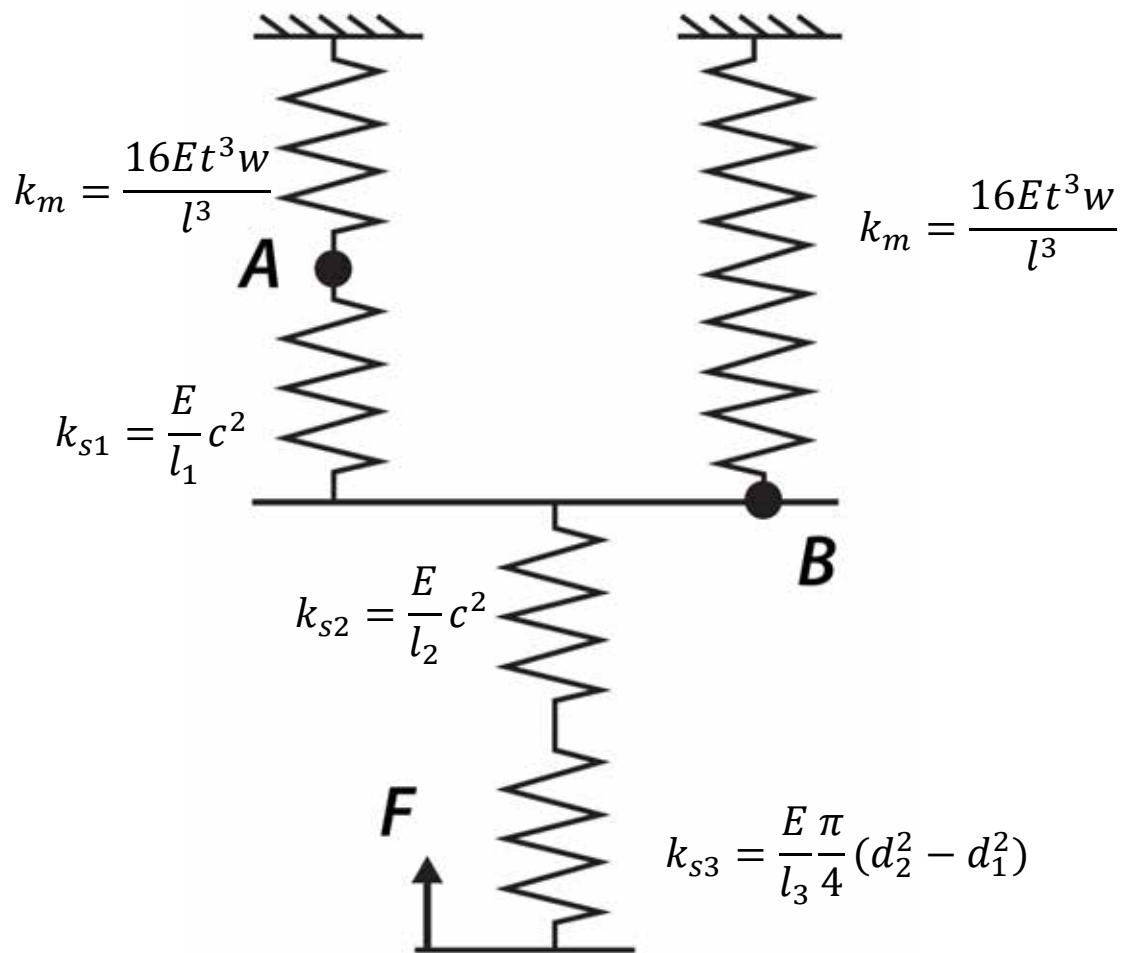


Рисунок 56 – Кинематическая схема датчика силы

Параметром  $c$  обозначена сторона квадратного сечения штока, символами  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  обозначены длины различных частей штока в

соответствии с рисунком 51. Символами  $d_1$  и  $d_2$  обозначены диаметры внутренней и внешней части кольца. В соответствии с представленной на рисунке 56 геометрией параметры  $d_1$  и  $d_2$  равны 6.35 мм и 12 мм, параметр  $l_3$  составляет 15 мм; при толщине мембран  $t = 3$  мм параметры  $l_1$  и  $l_2$  составляют 20 мм и 48 мм, при толщине мембран  $t = 2$  мм параметры  $l_1$  и  $l_2$  составляют 21 мм и 48.5 мм.

Исходя из представленных данных, в случае алюминиевой конструкции ( $E = 70$  ГПа,  $t = 3$  мм,  $l_1=20$  мм,  $l_2=48$  мм) жесткости  $k_{s2}$  и  $k_{s3}$  составляют 146 МН/м и 380 МН/м, при нагрузке 3000 Н сжатие соответствующих пружин составит 20.6 мкм и 7.9 мкм, что хорошо согласуется с данными рисунка 46. В случае стальной конструкции ( $E = 200$  ГПа,  $t = 2$  мм,  $l_1=21$  мм,  $l_2=48.5$  мм) жесткости  $k_{s2}$  и  $k_{s3}$  составляют 412 МН/м и 1086 МН/м, при нагрузке 3000 Н сжатие соответствующих пружин составит 7.3 мкм и 2.76 мкм, что также хорошо согласуется с данными рисунка 51 и подтверждает корректность представленной модели.

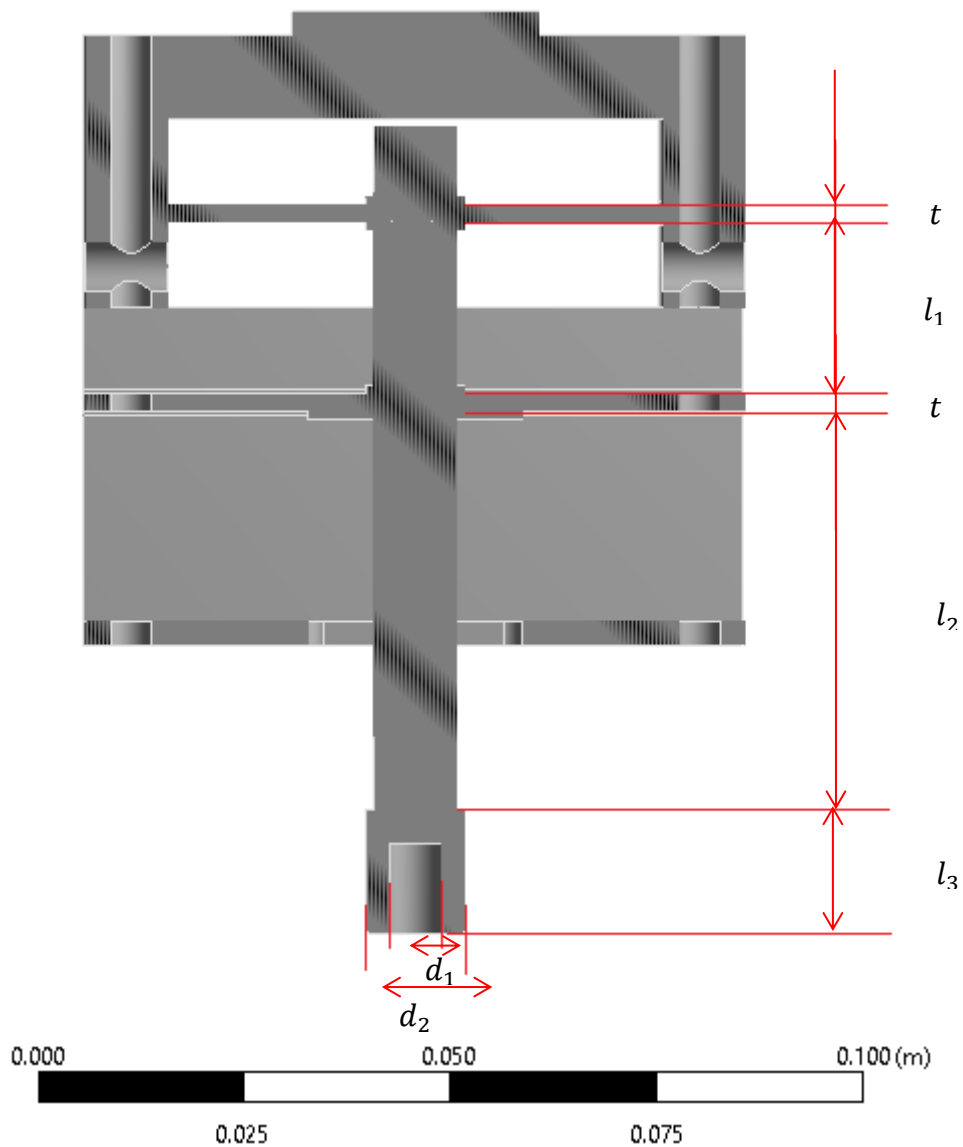


Рисунок 57 – Обозначения, используемые в аналитической модели

Данные пружины ( $k_{s2}$  и  $k_{s3}$ ) не влияют на калибровку датчика силы, которая определяется жесткостями  $k_m$  и  $k_{s1}$ , также как и вся остальная часть конструкции, расположенная между датчиком силы и поверхностью. Для определения итогового калибровочного коэффициента, заметим, что при используемом в датчике силы емкостном измерении перемещения двух параллельно соединенных конденсаторов, регистрируемый сигнал перемещения будет пропорционален сумме перемещений  $\Delta_A + \Delta_B$ . Соответственно итоговый калибровочный коэффициент  $k_\Sigma$  равен:

$$k_\Sigma = \frac{F}{\Delta_A + \Delta_B} \quad (47)$$



В силу кинематической схемы рисунка 56 данная величина просто совпадает с  $k_m$ . Таким образом, несмотря на то, что в силу наличия упругого элемента с жесткостью  $k_{s1}$  перемещения  $\Delta_A$  и  $\Delta_B$  различны, параллельное соединение измеряющих конденсаторов приводит к тому, что калибровочное значение жесткости просто совпадает с выражением каждой мембраны, определяется уравнением (43) и не зависит от жесткости  $k_{s1}$ . Ещё раз приведем эти значения:  $k_m = 11.2$  МН/м для конструкции из алюминия и  $k_m = 9$  МН/м для конструкции из стали. Полученный аналитический результат, в частности, позволят установить, что правильным способом измерения калибровочного коэффициента, исходя из результатов численного моделирования, является деление жесткости, полученной для перемещения нижней мембраны, пополам, т.е. половина от значений, представленных на рисунках 46 и 51 черными линиями.

### 5.3 Расчет деформации нижней части внешнего корпуса индентационного измерительного модуля

Внешний корпус конструкции состоит из двух составных частей, сжатых между собой шпильками. Нижняя часть корпуса, представленная на рисунке 58 содержит тонкие стенки, толщиной 4 мм, которые представляются наиболее хрупким элементом данной конструкции. Целью данного расчета являлось определение интенсивности напряжений, а также степени деформации конструкции.

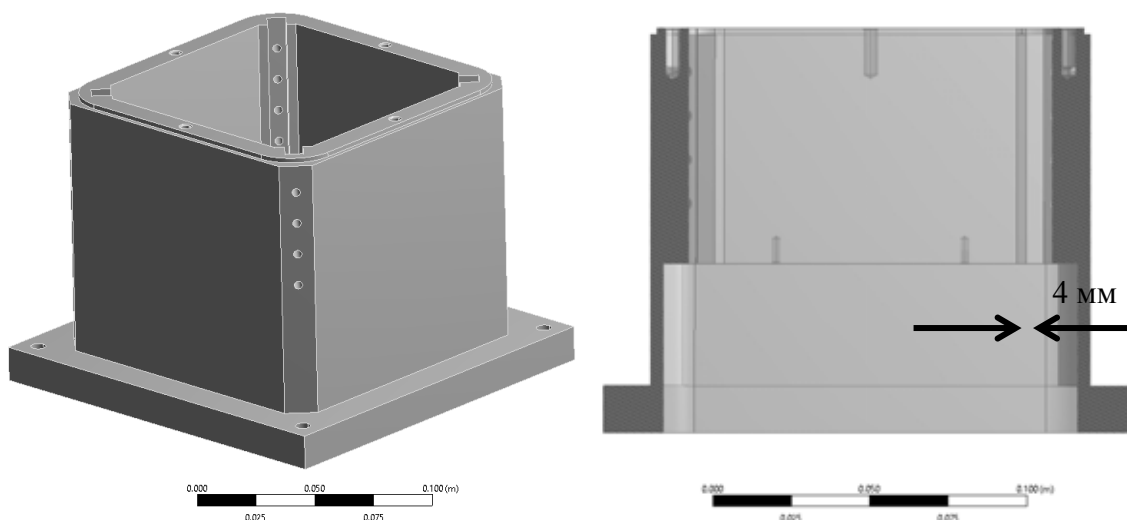


Рисунок 58 – Изображение нижней части корпуса целиком (а) и в поперечном разрезе (б)

Места приложения нагрузки и закрепления конструкции изображены на рисунке 59. Нагрузка направлена вверх и действует в местах соединения нижней части корпуса со шпильками, статическое усилие приложено в месте крепления нижней части корпуса к держателю, точнее на внутренних поверхностях отверстий. В качестве материала была задана сталь (модуль Юнга 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3).

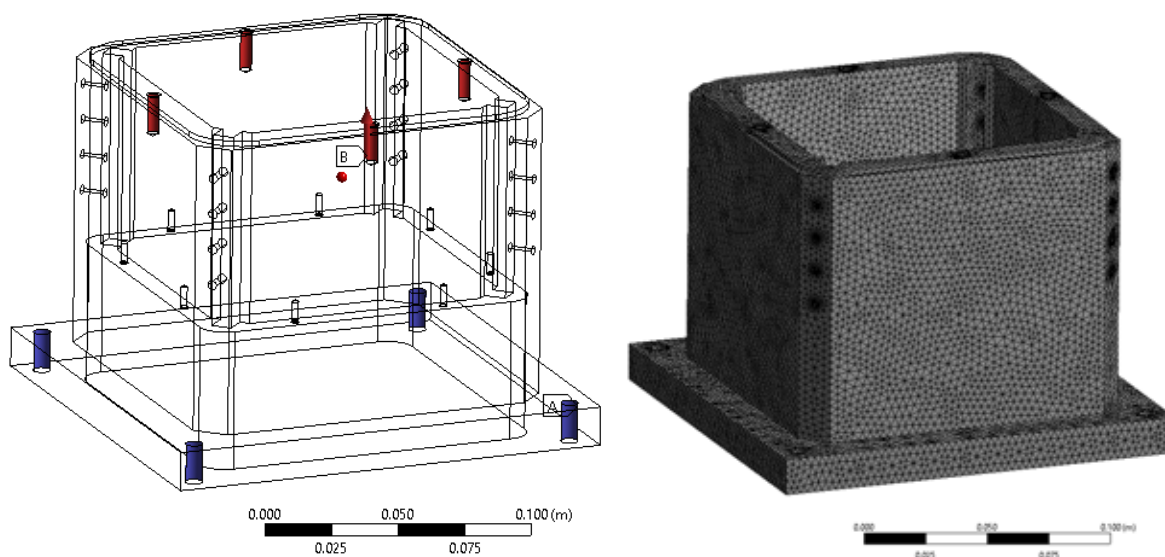


Рисунок 59 – а) места приложения нагрузки (обозначены красным цветом и буквой “А”) и места закрепления конструкции (обозначены синим цветом и буквой “В”) б) разбиение конструкции на конечные элементы

Полученное поле распределения напряжений и деформаций представлено на рисунках 60а и 60б.

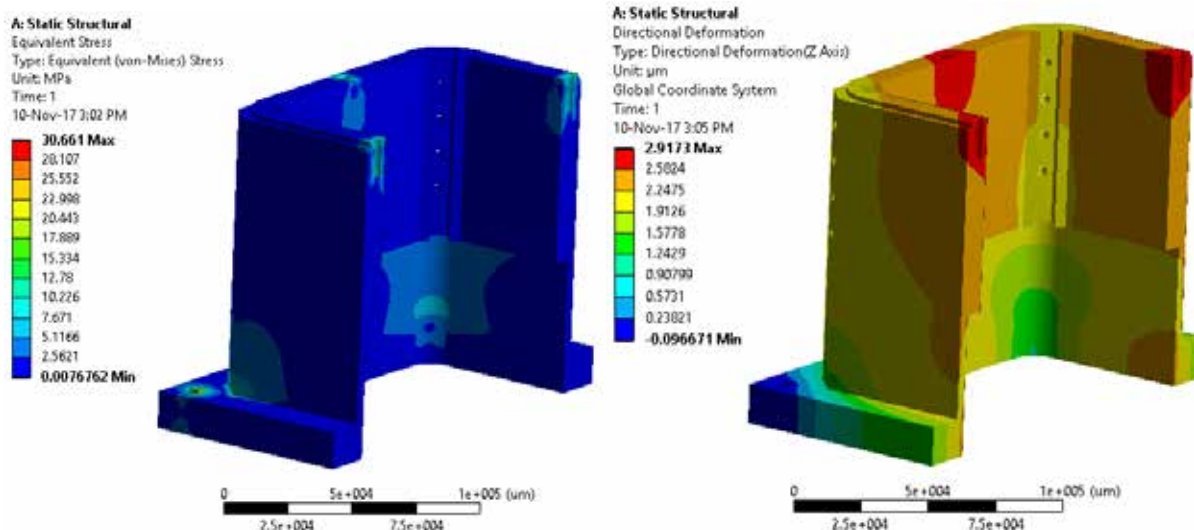


Рисунок 60 – Распределение напряжений (а) и деформаций в направлении z (б) для нижней части внешнего корпуса. Представлен разрез конструкции

Как видно из представленных изображений, наибольшие напряжения сосредоточены в местах крепления конструкции, а также в углах; их значения составляют величину порядка 10 МПа, что существенно меньше предела текучести конструкционной стали. Представленные данные по деформации корпуса указывают на то, что данная величина является неоднородной в месте крепления с верхним элементом внешнего корпуса, однако величина деформации составляет порядка нескольких мкм. В целом можно заключить, что нижние стенки толщиной 4 мм обеспечивают достаточную прочность конструкции. В случае изготовления корпуса из сплавов алюминия (модуль Юнга 70 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3) поле напряжений не изменится и будет таким же, как представлено на рисунке 60а. Значения деформаций увеличатся в  $200\text{ГПа}/70\text{ГПа} \sim 3$  раза, но по форме будут совпадать с таковыми, представленными на рисунке 60б.

#### 5.4 Расчет датчика перемещения индентационного измерительного модуля

Поперечный разрез корпуса датчика перемещения представлен на рисунке 61.

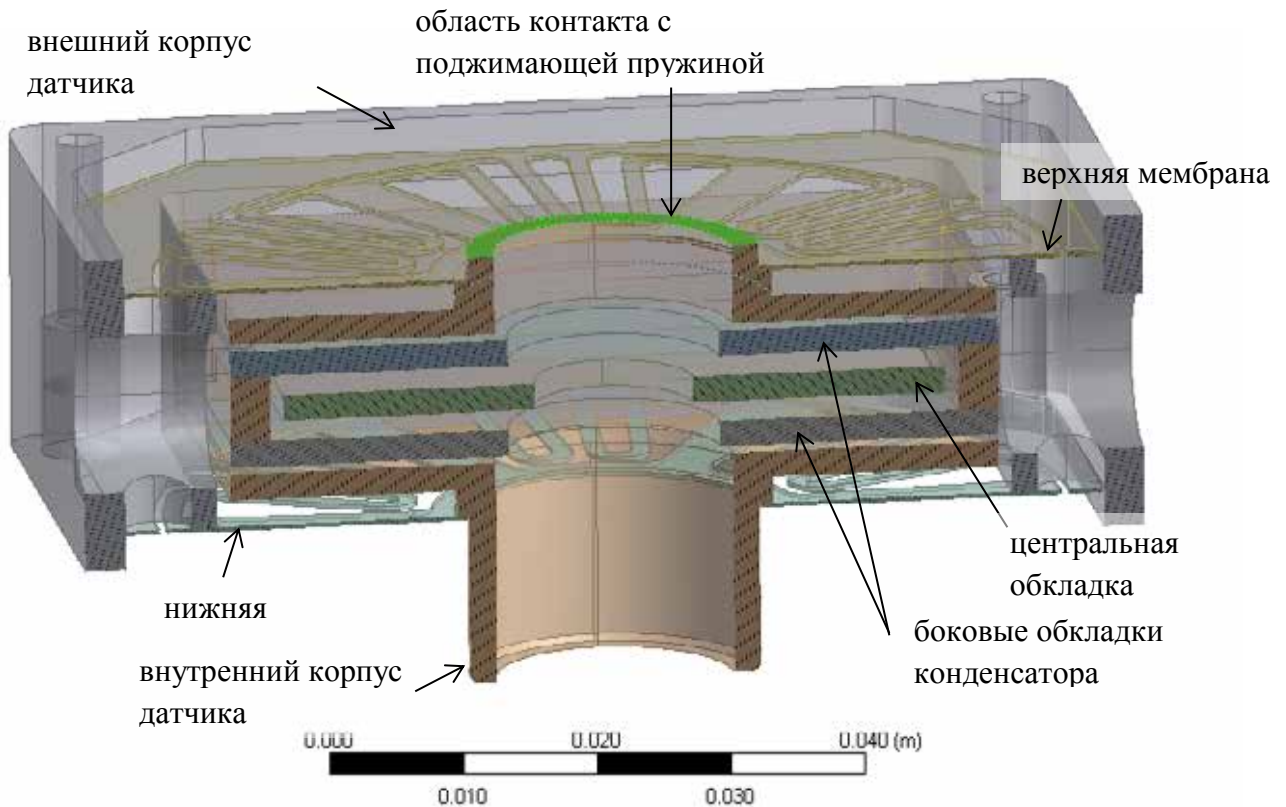


Рисунок 61 – Поперечный разрез корпуса датчика перемещения

Внешние обкладки конденсатора жестко соединены с внутренним корпусом датчика перемещения и двигаются вместе с соответствующими местами закрепления; внутренний корпус является намного более жестким, чем упругие элементы – мембраны, и поэтому включение дополнительных элементов (внешних обкладок), которые несколько увеличат и без того большую жесткость корпуса, представляется избыточным. Центральная обкладка вообще не соединена с датчиком и крепится на штоке, поэтому в данном расчете данный элемент представляет собой неподвижный недеформируемый объект, и тоже может быть исключена.

С другой стороны в расчет должна быть включена поджимающая пружина, вставленная в соответствующий корпус и упирающаяся в верхнюю поверхность внутреннего корпуса датчика перемещений (подписано и выделено на рисунке 61 зеленым цветом). Планируемая к использованию пружина обладает жесткостью  $\sim 2$  кН/м и в свободном состоянии имеет длину 35 мм. Датчик должен измерять перемещения в диапазоне до 3 мм и

поэтому в начальном состоянии пружина должна “поджимать” внутренний корпус с мембранами на величину  $\geq 1.5$  мм.

Для определения необходимой величины сжатия пружины, обеспечивающей начальный прижим на  $\geq 1.5$  мм, а также для определения жесткости и степени линейности всей конструкции был произведен расчет с граничными условиями, изображенными на рисунке 62а. Все элементы предполагались стальными (модуль Юнга 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3). Края мембраны были жестко (неподвижно) закреплены (граничное условие обозначено буквой «А»). На первом шаге статического расчета была определена деформация всей конструкции, создаваемая идеальной пружиной с жесткостью 2 кН/м, закрепленной между выделенной на рисунке 62б областью и жесткой поверхностью. На втором шаге к поверхности, выделенной на рисунке 62а прикладывалась сила, линейно возрастающая от 0 до 38.9 Н.

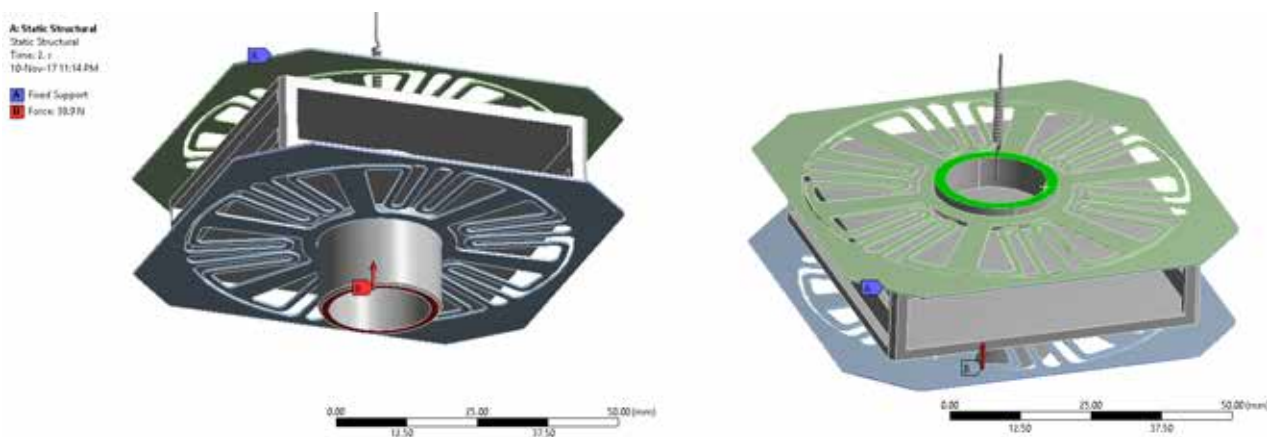


Рисунок 62 – Граничные условия расчета датчика силы (а) – вид снизу, (б) – вид сверху

Расчет показал, что для обеспечения необходимого хода  $\geq 1.5$  мм величина сжатия пружины должна составлять  $\geq 10$  мм, в таком случае преднагруженное смещение корпуса составляет  $\sim 1.56$  мм (рисунок 63).

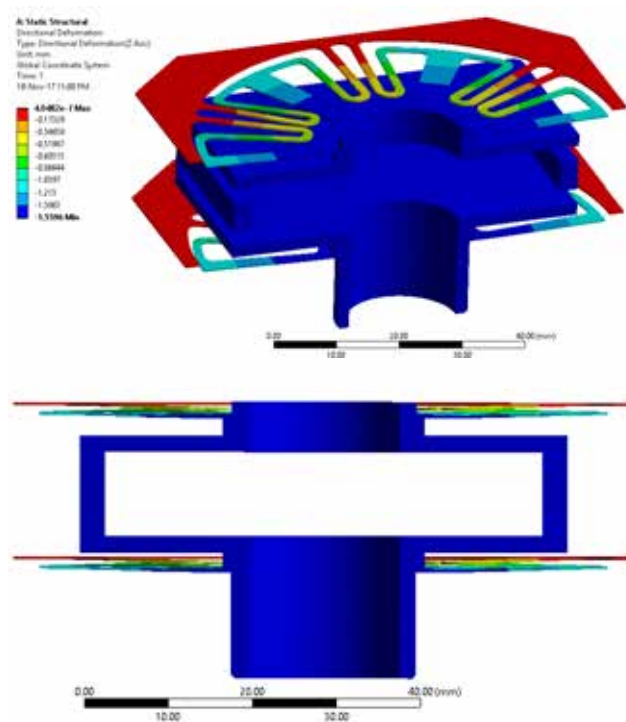


Рисунок 63 – Распределение вертикальных деформаций при отсутствии внешних сил кроме нагрузки, созданной поджимающей пружиной, максимальная деформация составляет -1.56 мм

Соответствующее поле напряжений показано на рисунке 64, видно, что максимальные напряжения достигаются в местах изгиба элементов мембран, и составляют менее 350 МПа, что указывает на возможность изготовления данных мембран из пружинной стали (например, 36НХТЮ).

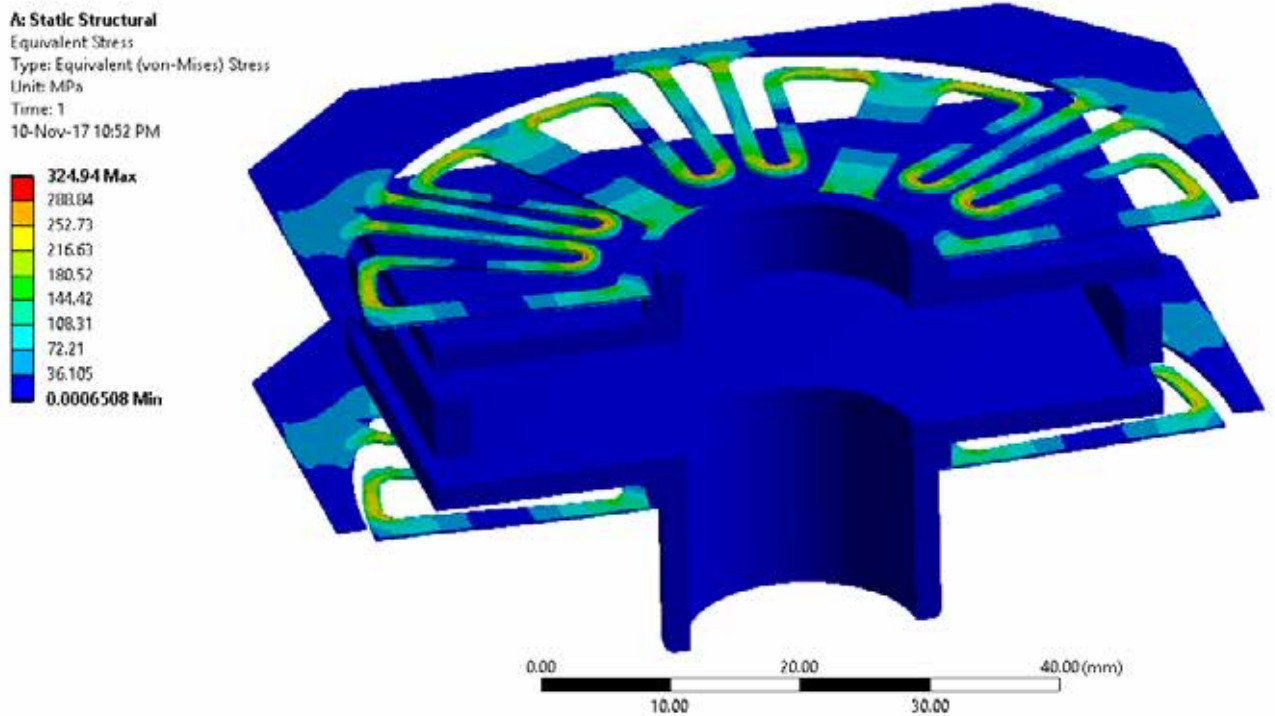


Рисунок 64 – Распределение напряжений при деформации 1.56 мм, созданной поджимающей пружиной

На втором шаге расчета в соответствии с представленным на рисунке 62а граничным условием была приложена нагрузка от 0 до 38.9 Н. Полученная деформация в зависимости от нагрузки была вычислена для точки, отмеченной на рисунке 65а, соответствующая зависимость представлена на рисунке 65б.

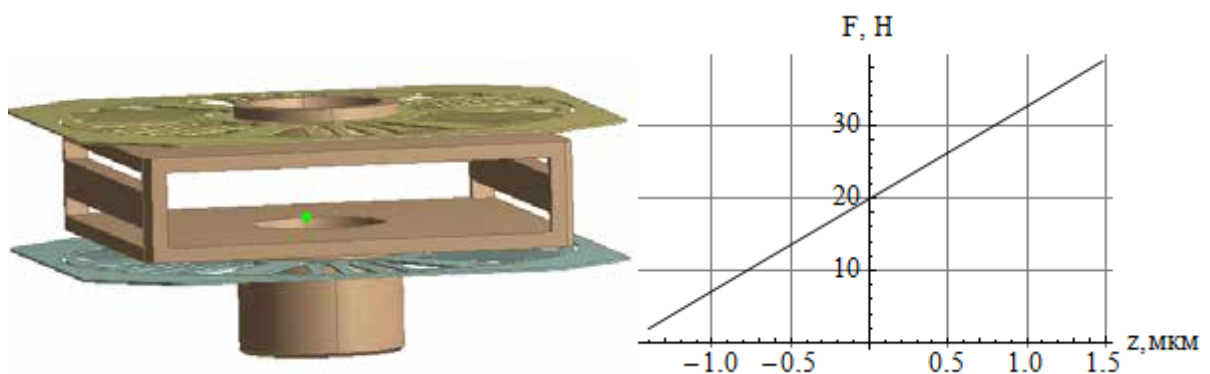


Рисунок 65 – а) распределение напряжений при деформации 1.56 мм, созданной поджимающей пружиной, б) зависимость силы от деформации

Линейная аппроксимация полученной зависимости дает значение жесткости  $k_z=12.76$  кН/м. Учитывая, что жесткость параллельной соединенной с датчиком пружины составила  $k_{spring}=2$  кН/м, жесткость самого датчика составляет 10.76 кН/м.

При вычитании из зависимости  $F-z$  для всей конструкции (рисунок 65б) линейной зависимости получается кривая, изображенная на рисунке 66.

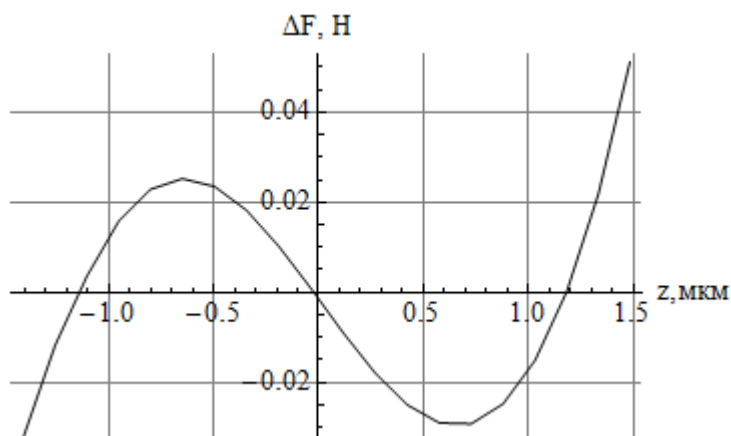


Рисунок 66 – Отклонение от линейности зависимости, представленной на рисунке 65б

Можно отметить, что данная кривая хорошо описывается полиномом пятой степени. При соответствующей аппроксимации исходной кривой  $F-z$  полиномом пятой степени и вычислении жесткости можно получить зависимость, приведенную на рисунке 67.

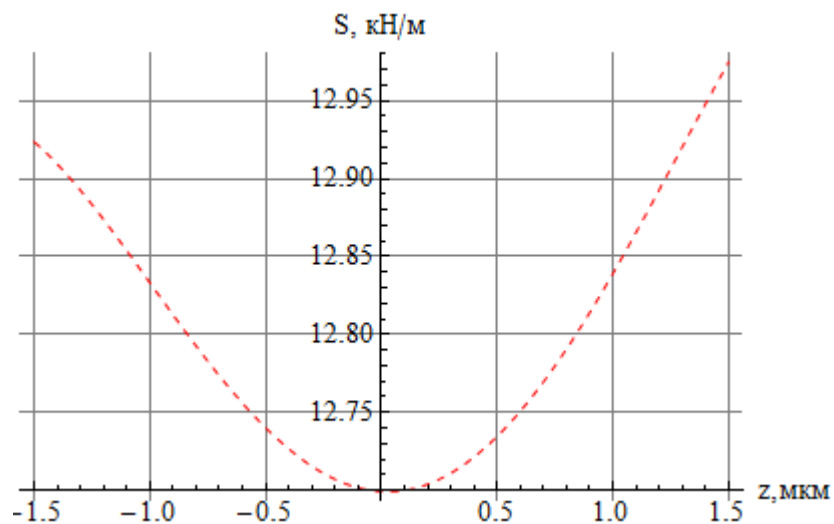


Рисунок 67 – Зависимость жесткости от деформации

Как видно из рисунка 67, изменение жесткости при 3 мм перемещении составляет около  $\pm 1\%$ . Нелинейность данной конструкции не является существенной, так как датчик перемещения не используется для вычисления силы. Принципиально важным моментом является то, что значение этой жесткости почти в 2000 раз меньше значения жесткости датчика



перемещения, а значит не может оказать существенного влияния на значения измеряемой силы. Более того, индентационное усилие прикладывается к штоку с закрепленной на нем подвижной обкладкой дифференциального конденсатора, измеряющего заглубление индентора, поэтому влияние жесткости используемых мембран на силовочувствительный элемент носит опосредованный характер и проявляется через общую деформацию корпуса iPoRTH и силовочувствительного элемента в нижней части которого крепится пружина, обеспечивающая первоначальный прижим опорного кольца.

### 5.5 Расчет деформации системы крепления и позиционирования измерительных модулей

Внешний вид рассчитываемой системы представлен на рисунке 68. Из системы позиционирования были исключены двигатели, которые приводят в движение модуль и оставлены только полозья (рельсы), по которым движется держатель модулей.

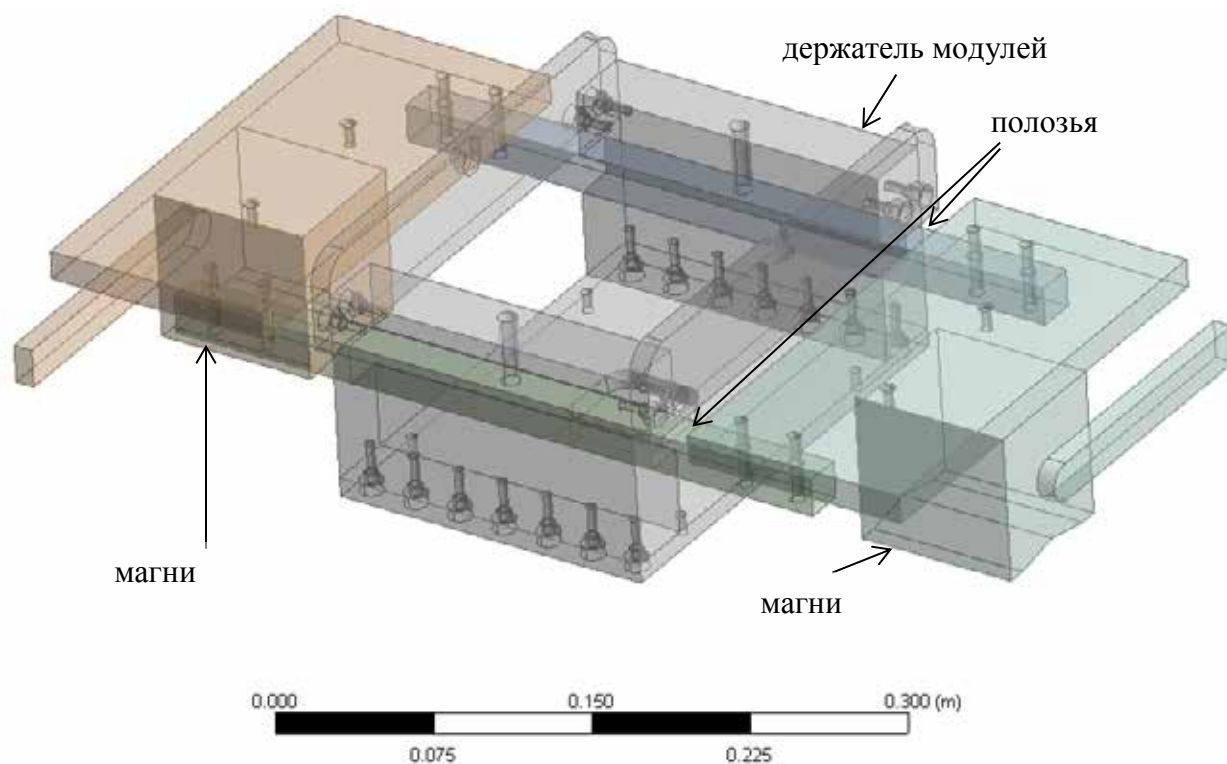


Рисунок 68 – Внешний вид рассчитываемой конструкции системы крепления и позиционирования измерительных модулей

Целью данного расчета, как это было указано выше, была оценка прочности и деформации конструкции при приложении максимальной нагрузки. В качестве граничных условий было задано неподвижное закрепление нижней поверхности магнитов (обозначено буквой «А» на рисунке 69), нагрузка была приложена в месте винтового крепления измерительных модулей, так как это изображено на рис 69 (буква «В»). В качестве материала для всех элементов была использована сталь (модуль Юнга 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3).

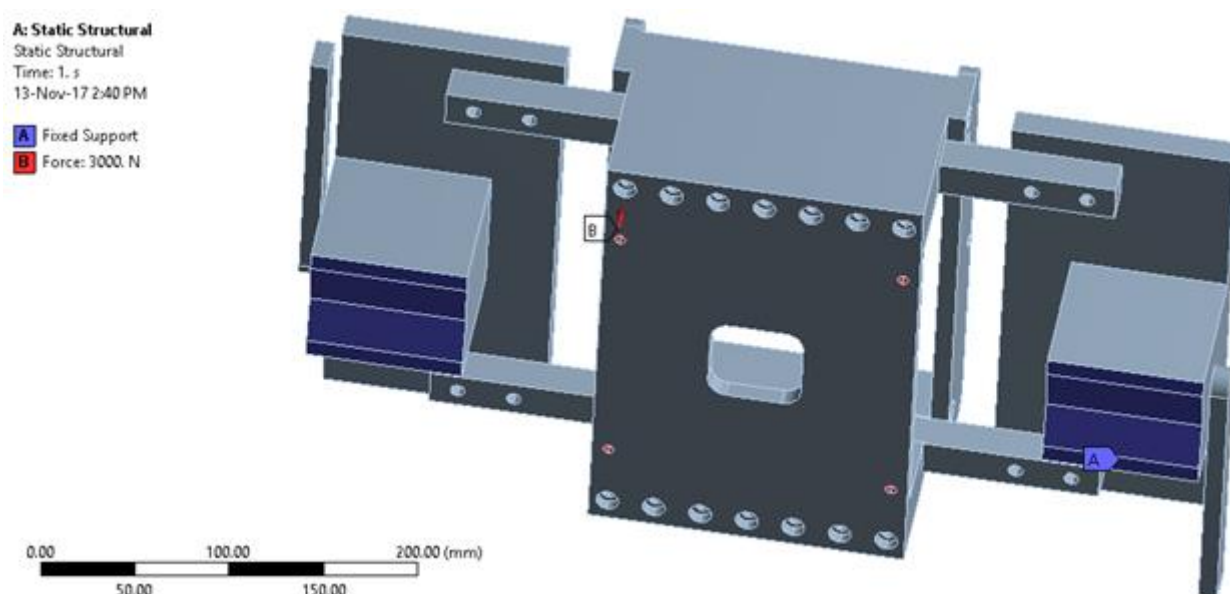


Рисунок 69 – Граничные условия закрепления и приложения нагрузки системы крепления и позиционирования измерительных модулей

Полученное поле напряжений Фон-Мизеса представлено на рисунке 70. На большей части поверхности системы крепления и позиционирования измерительных модулей напряжения не превышают нескольких десятков МПа, что на порядок меньше предела текучести всех марок стали, которые могут быть использованы для изготовления конструкции. Максимумы напряжения в области крепления измерительных модулей, т.е. в области резьбовых соединений, которые в рамках данного расчета были смоделированы гладкими поверхностями, рассмотрение напряжения, возникающего в резьбовых соединениях, представлено ниже.

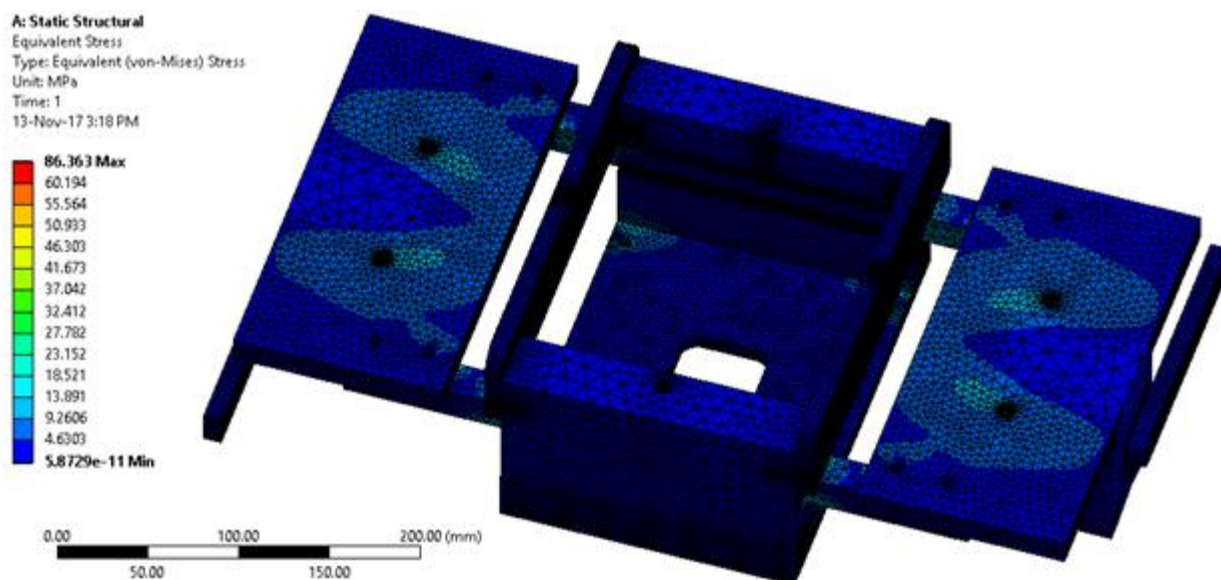


Рисунок 70 – Распределения напряжений, полученное в результате расчета системы крепления и позиционирования измерительных модулей

Соответствующее рисунку 70 распределение смещений представлено на рисунке 71. Видно, что максимальное значение деформации достигает почти 40 мкм, что позволяет оценить жесткость конструкции как  $\geq 75$  МН/м, что превышает жесткость конструкции датчика силы в несколько раз, однако также оказывает заметное влияние на его максимальный диапазон, измеряемый в мкм, и не изменяет калибровочное значение жесткости, переводящее измеряемое значение перемещения в силу.

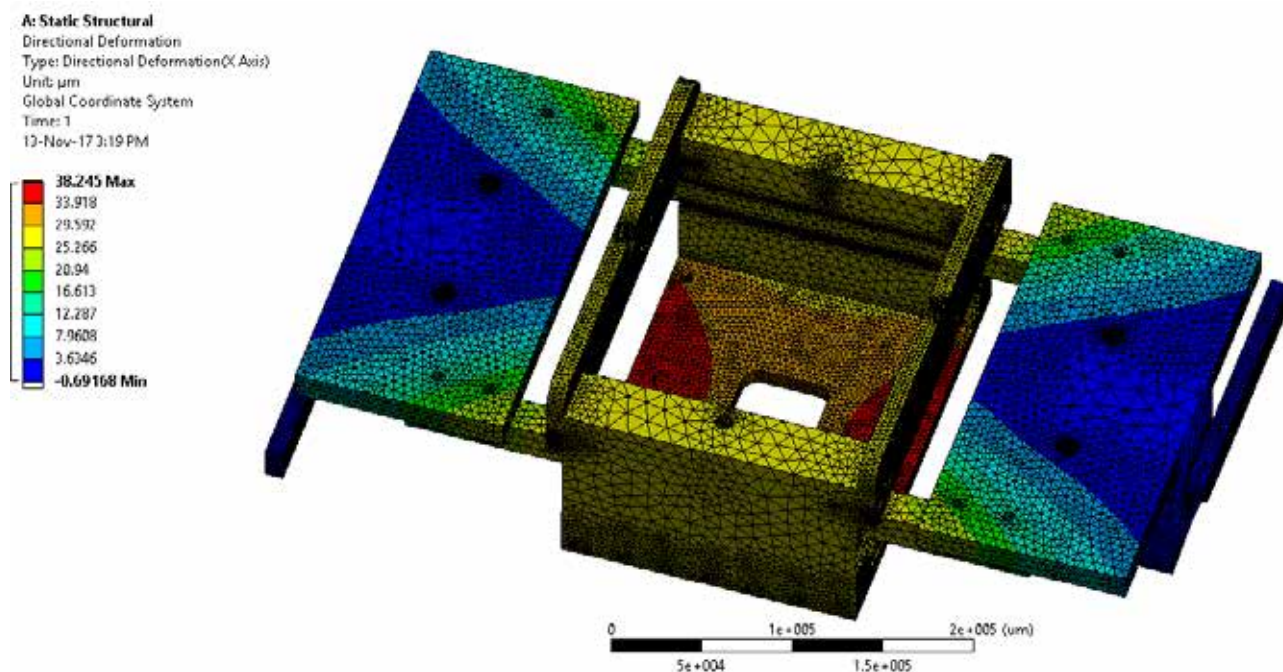


Рисунок 71 – Распределение смещения поверхности крепления под нагрузкой 3000Н

Для определения напряжений, возникающих в резьбовых соединениях можно воспользоваться, например ресурсом [95]. Согласно представленной информации для винтов М5-8.8 при коэффициенте трения 0.15 момент затягивания составляет 5.49 Н/м, данная величина учитывает как момент, возникающий в резьбовом соединении, так и момент, возникающий из-за трения головки винта о стягиваемую поверхность. Данный момент соответствует силе 5.45 кН. Пластическое разрушение винта с пределом текучести  $R_{p0.2}$  равным 640 МПа начинается при нагрузке 9.02 кН. Учитывая, что вся конструкция измерительного модуля крепится на 4 винта и максимальное усилие прикладываемое составляет 3кН, на каждый винт приходится нагрузка 0.75 кН, что не приводит к его разрушению ( $5.45 \text{ кН} + 0.75 \text{ кН} < 9.02 \text{ кН}$ ). С точки зрения части резьбы, находящейся в системе крепления, расчет максимального напряжения можно привести, используя источник [96]. Так в отверстии под винт М5 глубиной 15мм, в предположении, что предел сдвиговой прочности составляет 200 МПа, типичная для алюминиевых сплавов величина, нагрузка, при которой происходит срыв резьбы составляет 7.21 кН, данная сила также больше суммы силы затягивания и 5.45 кН и рабочей нагрузки 0.75 кН. Таким

образом, учитывая результаты аналитического расчета и моделирования, можно утверждать, что геометрические размеры конструкции системы крепления и позиционирования измерительных модулей обеспечивают ее достаточную прочность даже при изготовлении из алюминиевого сплава.

### **Результаты и выводы раздела**

Произведенные расчеты подтвердили реализуемость предлагаемой к изготовлению конструкции экспериментального образца iPoRTH. Механические напряжения, возникающие в элементах конструкции, не превышают предельно допустимых для используемых материалов, нелинейность силовчувствительного элемента не превышает 1% и соответствует требуемой по ТЗ точности при измерении силы. При этом корпус iPoRTH и систему крепления однозначно можно изготавливать из алюминиевых сплавов, а силовчувствительный элемент предпочтительнее изготовить из закаленной стали. При этом использование алюминиевых сплавов для изготовления практически всех элементов iPoRTH создает определенное технологическое удобство и уменьшает проблемы связанные с различным значением коэффициента теплового расширения для сталей и алюминиевых сплавов.

Осуществленное численное моделирование поведения основных элементов iPoRTH позволило корректно определить основные технические параметры используемых элементов и рабочие толщины упругих и несущих элементов. Полученные данные будут использованы при подготовке ЭКД на экспериментальный образец iPoRTH.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.5 ПГ и п.3.5 ТЗ.

## 6 Разработка ЭКД для изготовления макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH

Анализ выбранных технических решений и моделирование индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH привели к разработке эскизной конструкторской документации макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH в следующем составе:

- Схема деления структурная ЭД.iPoRTH.000 E1;
- Схема деления структурная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 E1;
- Чертеж общего вида ЭД.iPoRTH.МИИ.000 BO;
- Схема электрическая функциональная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 Э2;
- Перечень элементов схемы электрической функциональной ЭД.iPoRTH.МИИ.000 ПЭ Э2;
- Схема электрическая соединений и подключения объединенная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 Э0;
- Чертеж Корпус нижний ЭД.iPoRTH.МИИ.001;
- Чертеж Пластина-ограничитель ЭД.iPoRTH.МИИ.002;
- Чертеж Корпус верхний-блок 1 ЭД.iPoRTH.МИИ.003;
- Чертеж Корпус верхний-блок 2 ЭД.iPoRTH.МИИ.004;
- Чертеж Корпус верхний-блок 3 ЭД.iPoRTH.МИИ.005;
- Чертеж Крышка верхняя ЭД.iPoRTH.МИИ.006;
- Чертеж Пластина подвижная ЭД.iPoRTH.МИИ.007;
- Чертеж Крышка прижимающая ЭД.iPoRTH.МИИ.008;
- Чертеж Корпус внутренний ЭД.iPoRTH.МИИ.009;
- Чертеж Пластина-фиксатор ЭД.iPoRTH.МИИ.010;
- Чертеж Уголок-фиксатор ЭД.iPoRTH.МИИ.МИИ.011;
- Чертеж Наконечник индентирующий ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.001;
- Чертеж Гайка накладная ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.002;
- Чертеж Гайка упорная ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.003;

- Чертеж Контрогайка ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.004;
- Чертеж Стакан ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.005;
- Чертеж Корпус датчика силы ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.01.001;
- Чертеж Корпус датчика перемещения ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.001;
- Чертеж Корпус мембран ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.004;
- Чертеж Мембрана ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.005.

Данная документация представлена в Приложении Б.

## 7 Изготовление макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH

В соответствии с подготовленной эскизной конструкторской документацией были закуплены и изготовлены все необходимые для сборки iPoRTH элементы. После проведения исследовательских испытаний и установления соответствия упругих свойств изготовленных элементов требованиям ТЗ была осуществлена сборка экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH. Ее основные этапы представлены ниже.

Ключевым элементом, обеспечивающим линейный характер перемещения силоизмерительного блока с установленном на нем индентором, является четырех полосковый линейный транслятор, состоящий из внешней и внутренней части. Изображения этих элементов со вставленными в соответствующие пазы рельсовыми направляющими представлены на рисунке 72.

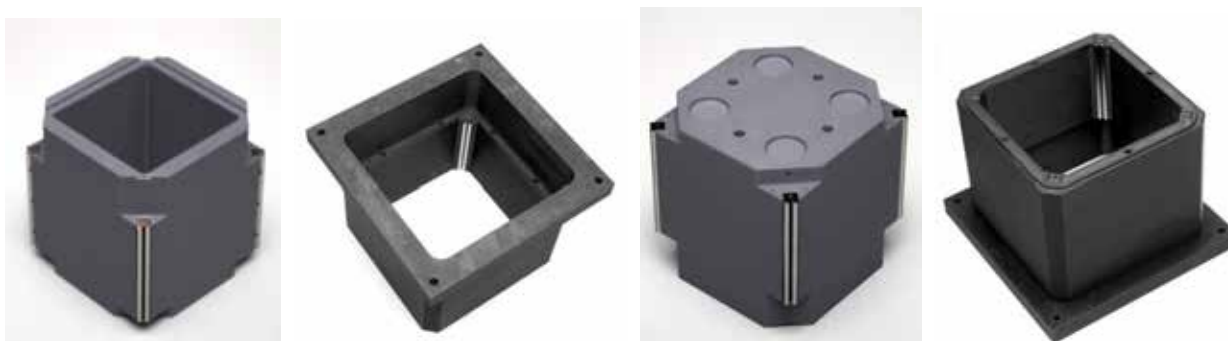


Рисунок 72 – Взаимноподвижные элементы конструкции iPoRTH с установленными в них рельсовыми направляющими

Далее в подвижный внешний корпус силочувствительного элемента были установлены пружины и он был соединен с нижним переходным элементом к которому крепится линейный актуатор, рисунок 73.





Рисунок 73 – Сборка пружинного блока и его соединение с узлом связки с актуатором

Модуль, используемый для измерения силы при инструментальном индентировании, располагается внутри подвижного модуля и вывешивается на пружинах удерживающих модуль измерения перемещений. Данный модуль является одним из наиболее важных элементов конструкции, перед его изготовлением для определения технологичности конструкции было проведено его прототипирование при помощи установки для послойного топологически неоднородного формирования методами аддитивных технологий оснастки для исследований механических свойств макро-объектов. Данный модуль вставляется в подвижный модуль, выдвижение которого, обеспечивается пружиной, выставляющего его в рабрчее положение и обеспечивающей прижим силочувствительного модуля к днищу подвижного модуля. Общий вид этих модулей представлен на рисунке 74.

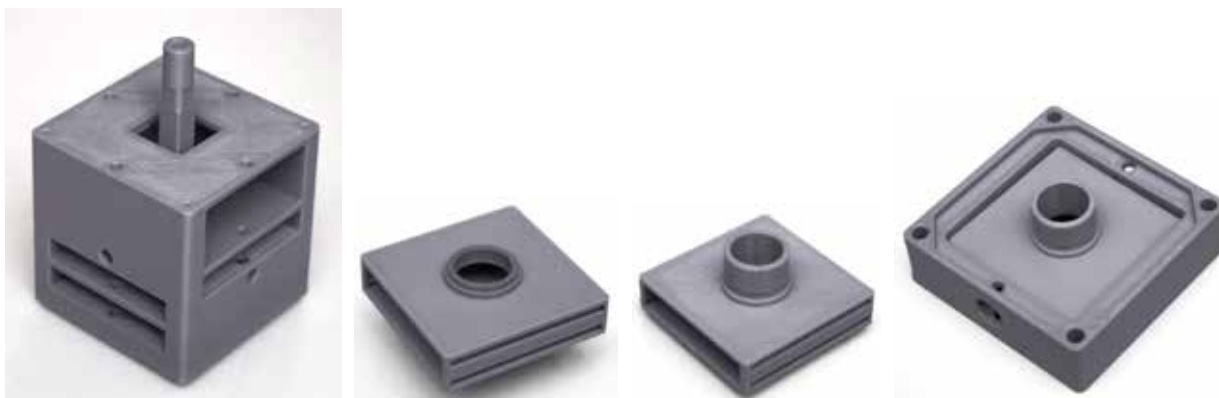


Рисунок 74 – Силочувствительный элемент, вид сверху и снизу на подвижный элемент датчика перемещения и узел измерения перемещения в сборе

На рисунке 75 представлены элемент преднагружения опорного кольца, накидная гайка крепящая держатель индентора и накручивающийся на датчик измерения наконечник с опорным кольцом (масштаб на соседних рисунках и по отношению к предыдущим, и к последующим не соблюден).



Рисунок 75 – Элементы, обеспечивающие крепление индентора и упор опорного кольца в поверхность образца с заданной силой

Система крепления актуатора и эффект от его работы в ненагруженном состоянии представлены на рисунке 76. Измеренное перемещение подвижного блока оказалось более 30 мм, что более чем достаточно для подвода к поверхности и прикладывания силы 3 кН с учетом данных по испытанию пружинного блока.



Рисунок 76 – Актюатор и обеспечиваемое им перемещение подвижного узла iPoRTH

Модуль измерения перемещений находится в том же корпусе, что и силочувствительный модуль и приводится в рабочее положение с помощью пружины, обеспечивающей поджим контактного кольца к тестируемому образцу. Внешний вид этой конструкции уже установленной в корпус iPoRTH представлен на рисунке 77.

Данный элемент должен свободно перемещаться при условии отсутствия контакта опорного кольца с поверхностью образца. Далее опорное кольцо утапливается и выходит наконечник индентора. После наступления контакта сферического наконечника с поверхностью материала начинается процесс индентирования.



Рисунок 77 – Силочувствительный элемент и датчик перемещения, установленные в корпус iPoRTN без последней крепежной секции., последовательные стадии процесса

После проверки плавности хода и регулировки натяга рельсовых направляющих была произведена окончательная сборка экспериментального образца индентационного измерительного модуля iPoRTN, рисунок 78. Из рисунка хорошо видно, что индентационная головка может быть полностью убрана внутрь корпуса iPoRTN, что важно для исключения повреждения сфероконического индентора при его установке на устройство позиционирования и осуществлении транспортных операций.



Рисунок 78 – Вся конструкция экспериментального образца индентационного измерительного модуля iPoRTH в сборе в рабочем и перевернутом положении

Далее приведено несколько крупных планов поясняющих логику работы опорного кольца и системы преднагружения датчика перемещения, рисунок 79.



Рисунок 79 – Крупный план индентирующей головки экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH

После завершения сборки экспериментального образца индентационного измерительного модуля iPoRTH было осуществлен тестовый запуск актюатора и в ручном режиме и проверена работоспособность всех систем включая датчик перемещений, все сигналы и рефлекссы соответствовали ожидаемым. Рабочее перемещение подвижного блока, содержащего силочувствительный модуль и датчик перемещения,

оказался, как и планировалось при разработке, составило 30 мм, что достаточно для подвода к исследуемой поверхности и корректной работы пружинного блока.

На следующем этапе работ после окончательной настройки опытного образца радиоэлектронного обеспечения и написания тестовой версии программного обеспечения будут продолжены работы по проверке работоспособности iPoRTH и оценке его метрологических характеристик.

### **Результаты и выводы раздела**

В процессе изготовления и сборки экспериментального образца iPoRTH не было выявлено грубых конструктивных просчетов и все изделие было успешно собрано и проверено на адекватность функционирования всех основных узлов. Экспериментальный образец iPoRTH готов для сопряжения его с разрабатываемой электроникой, проведения исследовательских испытаний и отработки разрабатываемого ПО, осуществляющего управление прибором и обработку экспериментальных данных.

Акт и протокол испытаний приведены в Приложении В.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.7 ПГ и п.3.7 ТЗ.

8 Разработка Программы и методик исследовательских испытаний макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH

Программа и методики исследовательских испытаний макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH приведены в Приложении Г.

## 9 Исследовательские испытания индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH

### 9.1 Механические испытания ключевых элементов экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH

На данном этапе работ предусмотрены механические испытания отдельных элементов конструкции разрабатываемого экспериментального образца iPoRTH и проверка работоспособности основных актюаторных, механических и других исполнительных узлов и механизмов входящих в состав индентационного модуля

В конструкции индентационного модуля присутствует элемент обеспечивающий плавность временной развертки силы при индентировании состоящий из специального пружинного блока (деакселератора), рисунок 80. Данный блок должен обеспечивать перевод линейного перемещения транслятора в линейно нарастающую силу. Рабочий ход данного пружинного блока под нагрузкой 3000 Н должен быть не менее 10 мм, что обеспечивает десятикратное замедление скорости движения штока актюатора по отношению к скорости деформации рабочих упругих элементов силоизмерительного блока.

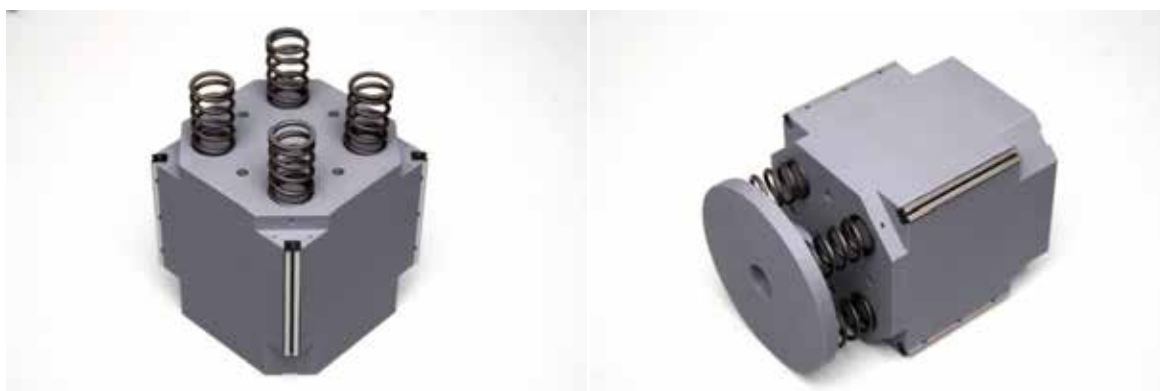


Рисунок 80 – Пружинный блок, обеспечивающий плавность развертки по силе при индентировании, с установленными рельсовыми направляющими

Для определения рабочей жесткости пружинного блока, он был установлен на универсальную испытательную машину марки Instron, рисунок 81.





Рисунок 81 – Схема измерительного нагружения пружинного блока

В соответствии с методикой испытаний к блоку прикладывалась линейно нарастающая нагрузка и фиксировалось рабочее перемещение. Типичная кривая нагрузка-разгрузка представлена на рисунке 82. Приведенные измерения показали высокую стабильность коэффициента преобразования смещения в силу малую величину механического гистерезиса.

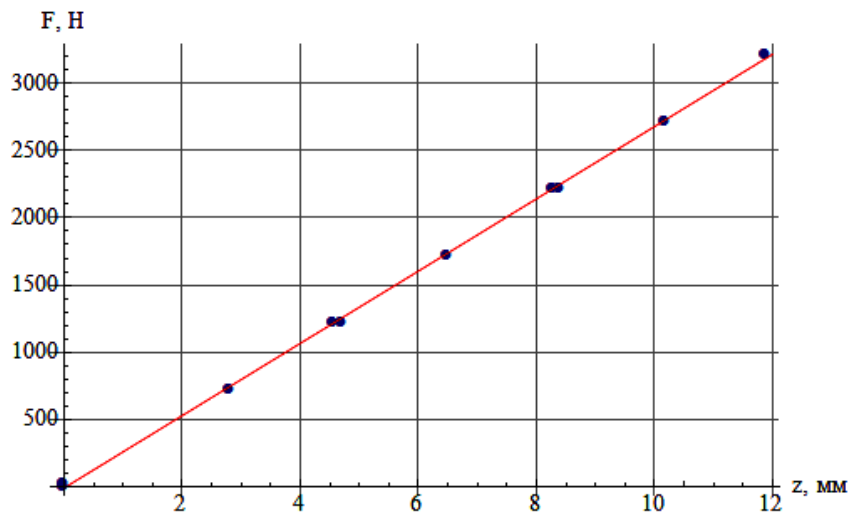


Рисунок 82 – Экспериментальные данные, полученные при испытаниях рабочей версии пружинного блока

Исходя из полученных данных было получено следующее значение жесткости пружинного блока –  $K_{пб} = (269 \pm 2)$  Н/мм. Такое значение жесткости является оптимальным при работе с нагрузками до 3 кН. Для использования модуля при меньших нагрузках целесообразно устанавливать пружины с другими упругими характеристиками. Примеры таких пружин нужного типоразмера представлены на рисунке 83.



Рисунок 83 – Примеры пружин различной жесткости пригодных для установки в пружинный блок iPoRTH

Испытания пружинного блока продемонстрировали работоспособность предложенного подхода и работоспособность конструктивного решения обеспечивающего плавный подвод сферического индентора к исследуемой поверхности и осуществление измерительного индентирования с требуемой по ГОСТу линейной разверткой по силе.

В кинематической схеме экспериментального образца iPoRTH предусмотрен специальный модуль для контроля нагрузки, с которой происходит внедрение индентора в поверхность образца. Внешний вид данного силочувствительного модуля представлен на рисунке 84.



Рисунок 84 – Внешний вид модуля измерения силы используемого в iPoRTH

В соответствии с методикой испытаний данный модуль был размещен между рабочими поверхностями универсальной испытательной машины марки Instron и подвергнут контролируемому сжатию на заданную величину

с измерением необходимой для этого силы, рисунок 85. Хорошо видно, как уменьшается зазор между верхушкой рабочего штока (на рисунке он расположен внизу) и опорной поверхностью силочувствительного модуля. Данный зазор выполняет роль ограничителя свободного хода штока и предохраняет плоские рабочие пружины от их возможной пластической деформации и поломки при случайном нагружении с силой существенно большей 3кН.

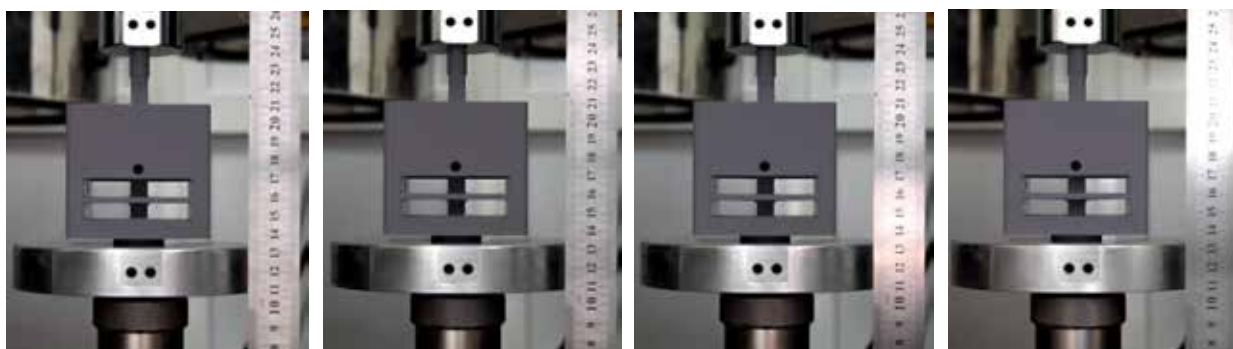


Рисунок 85 – Последовательные стадии испытательного сжатия модуля измерения силы, используемого в iPoRTH

Все измерения осуществлялись, как и при испытаниях пружинного блока, с использованием встроенных датчиков силы и перемещения универсальной испытательной машины марки Instron. Изображение линейке на рисунках 85 и 81 приведено, как чисто масштабный фактор. После обработки экспериментальных данных было получено следующее значение рабочей жесткости –  $K_{см} = (3125 \pm 50)$  Н/мм. Полученное значение позволяет использовать данный модуль для измерения усилий, приведенных в ТЗ на ПНИЭР. Для корректной работы данного модуля необходимы емкостные преобразователи с рабочим ходом 1 мм, что соответствует заложенным при разработке параметрам свободного хода штока индентационного модуля iPoRTH. Экспериментальные данные, полученные в ходе одного из испытаний данного модуля, представлены на рисунке 86.

Полученная зависимость демонстрирует линейность рабочей характеристики и безгистерезисность хода штока в рамках достигнутой в

эксперименте точности измерений. Полноценные метрологические испытания экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH могут быть произведены только в полностью собранном виде, поскольку взаимодействие различных частей iPoRTH невозможно корректно реконструировать на основе испытаний отдельных частей. Такого рода испытания будут проведены на следующем этапе работ в ходе отработки методов обработки измерительной информации.

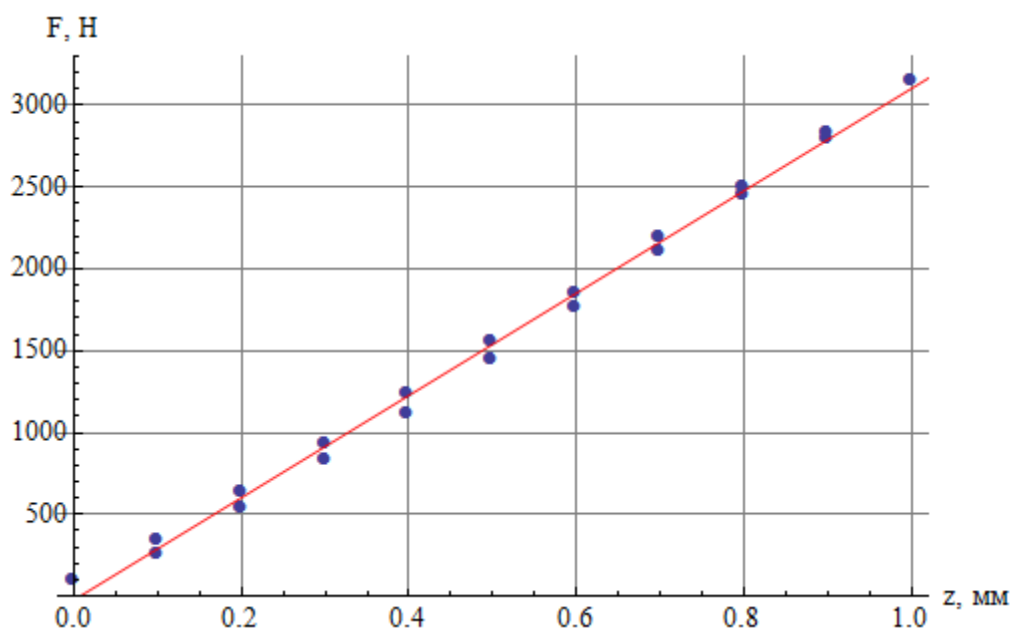


Рисунок 86 – Экспериментальные данные, полученные при испытаниях модуля измерения силы, используемого в iPoRTH

Проведенные испытания продемонстрировали работоспособность основных конструктивных узлов iPoRTH и показали возможность сборки экспериментального образца индентационного модуля и проведение его исследовательских испытаний в собранном виде.

## 9.2 Определение поля механических деформаций методом корреляционной обработки оптических изображений

Современные методы обработки изображений позволяют с высокой точностью фиксировать изменения формы поверхности твердых тел и

определять картину возникающих в изделии деформаций. Один из популярных методов широко используемый при испытаниях на универсальных разрывных машинах основан на корреляционной обработке серии последовательных изображений деформируемого образца и определения на основе корреляционной обработки поля деформаций, в англоязычной литературе этот метод называется – Digital Image Correlation.

В ходе испытаний силовчувствительного модуля была опробована работоспособность данного метода, для определения смещений была использована установка прецизионного контроля микродеформаций оптическими методами. На рисунке приведено изображение интерфейса используемой программы со следами разметочной идентификации исследуемой поверхности, рисунок 87.



Рисунок 87 – Идентификация анализируемой поверхностей и определение границ поля корреляционного анализа

Метод Digital Image Correlation предполагает корреляционную обработку тонкоструктурированных поверхностей с гауссовым симметричным по всем направлениям случайным распределением яркости изображения. Обычно такая случайная фактура поверхностей не возникает сама собой после механической обработки и формируется специальными методами, типа пескоструйной обработки и разнонаправленного шлифования. При этом чем мельче шаг оптической неоднородности поверхности (ее шероховатости) тем более точной может быть картина восстановленной деформации. Как раз радиус корреляции видимой оптической шероховатости определяет

предельное латеральное разрешение метода Digital Image Correlation, рисунок 88.

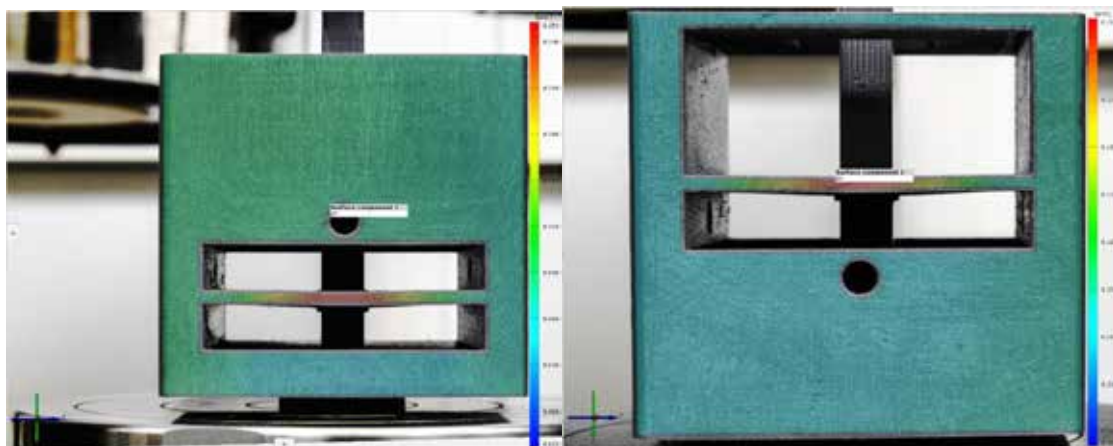


Рисунок 88 – Полученные изображения демонстрируют чувствительность метода Digital Image Correlation правильному выбору направления, вдоль которого происходит поиск деформационного смещения поверхности

На рисунке 89 приведены очищенное и наложенное на объект поле вертикальной деформации силовослепительного модуля при нагрузке 3 кН. Хорошо видно не полное покрытие анализируемой поверхностью деформируемой детали.

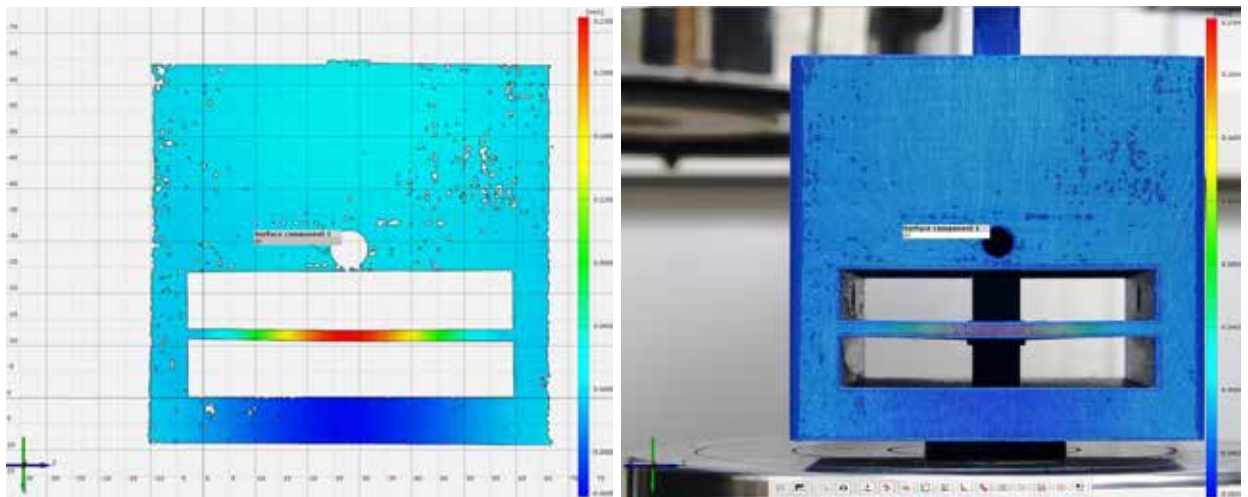


Рисунок 89 – Обработанное итоговое изображение с координатной сеткой, демонстрирующее совпадения рассчитанных методом Digital Image Correlation данных с деформацией, определяемой по прямым геометрическим измерениям

Итоговые изображения поля деформаций, полученные в ходе испытаний силовочувствительного модуля представлены на рисунке 90. Среднее изображение, демонстрирует важность правильной подготовки фактуры контролируемой поверхности.



Рисунок 90 – Полученная картина деформаций хорошо соответствует расчетной

Проведенное в ходе испытаний силовочувствительного модуля тестирование работоспособности метода Digital Image Correlation и установки для прецизионного контроля микродеформаций оптическими методами показало работоспособность данного подхода и перспективность

его использования при оптическом анализе поля остаточных деформаций, возникающих в тестируемом материале в ходе выполнения инструментального индентирования его поверхности разного типа наконечниками.

### **Результаты и выводы раздела**

Силовые испытания основного силовосвительного модуля экспериментального образца iPoRTH подтвердили работоспособность предложенной конструкции и правильность численных расчетов. Выбранная монолитная конструкция данного элемента подтвердила высокую стабильность ее механических характеристик и отсутствие разного рода течностей и дрейфов свойственных составным конструкциям силовосвительного элемента. Проверка кинематической работоспособности экспериментального образца iPoRTH подтвердила правильность осуществленных при подготовке ЭКД расчетов и верность составленных 3D моделей основных элементов iPoRTH и изделия в целом.

Акт и протокол испытаний приведены в Приложении Д.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.9 ПГ и п.3.9 ТЗ.



## 10 Проведение экспериментальных исследований с целью выработки рекомендаций по набору измеряемых характеристик в зависимости от способов обработки наиболее распространенных конструкционных материалов

Работы данного раздела выполнены Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Согласно требованиям п. 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6 ТЗ экспериментальный образец iPoRTN должен производить измерения следующих величин: твердости  $H_{IT}$ , модуля упругости  $E_{IT}$ , предела текучести, коэффициента и показателя деформационного упрочнения, высоты рельефа, а параметра шероховатости  $R_a$ .

Измерение механических характеристик неразрывно связано с пробоподготовкой образцов, в частности с обеспечением гладкости поверхности. Естественно, что даже лабораторный образцы изготавливается не идеально гладкими, а обладают заданной степенью шероховатости. Допустимая степень шероховатости определяется глубиной, до которой проводится измерения: так в методе инструментального индентирования согласно ГОСТ 8.748-2011 для обеспечения неопределенности результата не более 5% требуются превышение глубины индентирования величины шероховатости  $R_a$  в 20 раз. Таким образом, измерение механических характеристик, особенно в полевых условиях неразрывно связано с качеством поверхности. Для получения более детальной оценки о степени и характере влияния шероховатости, а также о возможности уменьшения методической погрешности измеряемого результата необходимо использовать модельные представления, а также измерить ряд параметров, рассмотренных в данном разделе.

Возможность учета шероховатости была продемонстрирована, например, в работе [97], в которой предлагалось производить коррекцию

измеряемых значений твердости за счет внесения поправки  $h \rightarrow h_{max} - 2.46 R_a$ . Подобный учет подразумевает измерение одного дополнительного параметра для коррекции и фактически предполагает, что в область взаимодействия попало достаточно много локальных пиков шероховатости. В общем случае естественно предположить, что учет неровности поверхности требует учета не только одного параметра, характеризующего распределение высот вдоль оси  $Z$ , но также и учета параметров, определяющих пространственную частоту поверхности.

Измеряемые характеристики шероховатости поверхности и в частности спектр могут быть получены из трехмерного изображения, которое в свою очередь может быть получено с использованием АСМ. В данной работе определение характеристик шероховатости поверхности было проведено при помощи АСМ НТegra-Прима; в качестве образцов был использован поликорбанат с различной степенью шероховатости поверхности: начиная от нанометрового, полученного при отливке-изготовлении образца, до шероховатости в единицы микрон, полученной после шлифовки поверхности наждачными бумагами с различным размером зерен. Пример изображения поверхности гладкого образца поликорбаната приведен на рисунке 91.

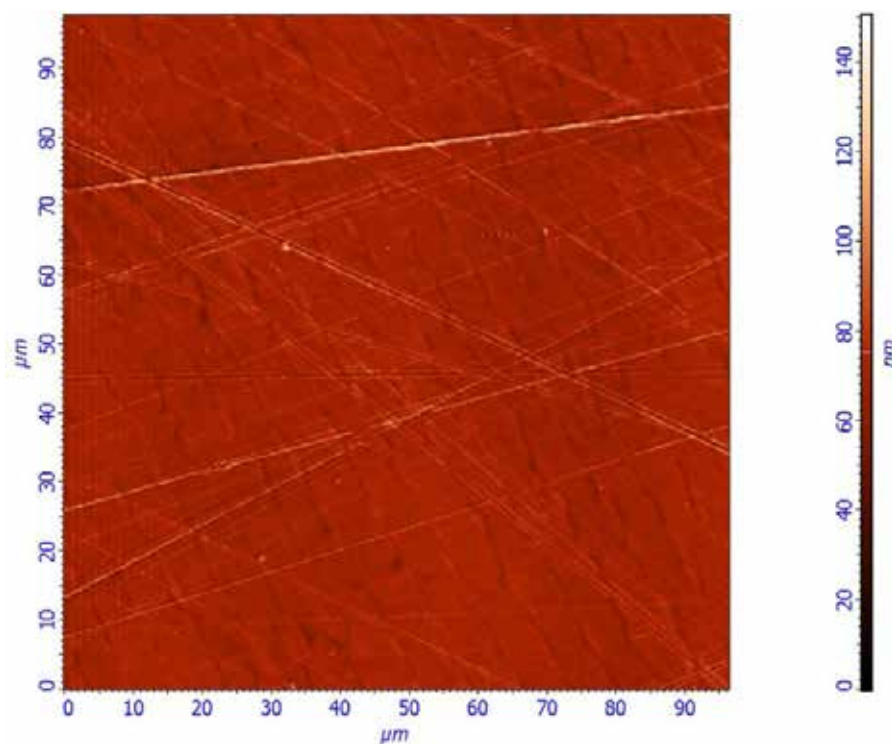


Рисунок 91 – Гладкая поверхность образца поликарбоната, полученная после полировки поверхности

Разброс неровностей поверхностей в областях не содержащих царапины составляет порядка 10 нм. Данную поверхность в сравнении с шлифованными поверхностями можно считать идеально гладкой. На рисунке 92 приведены изображения рельефа поверхности, полученного с использованием наждачной бумаги различной степени зернистости (параметр соответствует маркировки по ISO-6344): 180 (а), 320(б,в), 500 (г), 800 (д), 1200 (е).

Для характеристики пространственного спектра частот можно использовать автокорреляционную функцию или спектральную плотность мощности, что является эквивалентным в силу теоремы Винера-Хинчина. Автокорреляционные функции для массивов, изображенных на рисунке 92, приведены на рисунке 93.

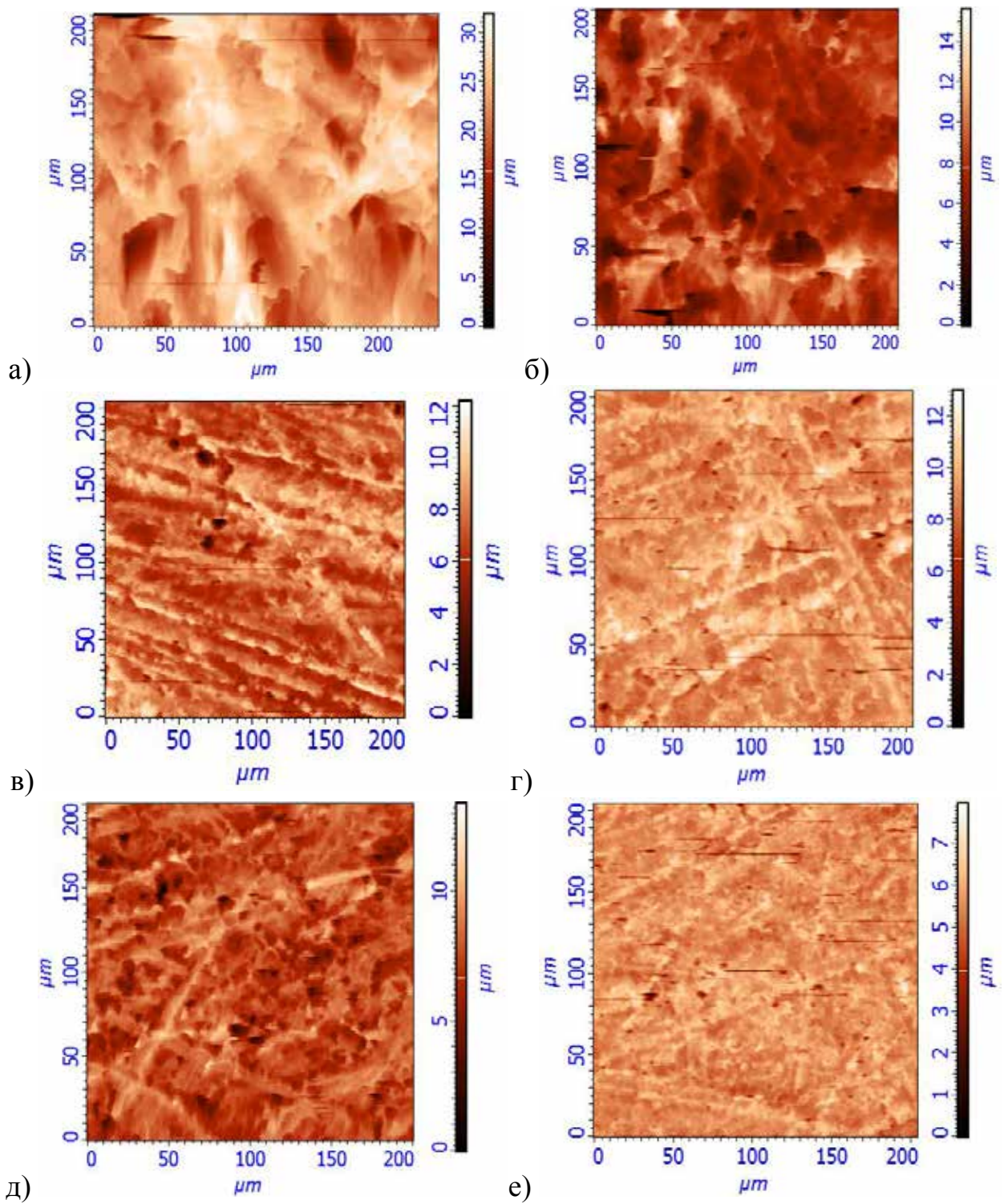


Рисунок 92 – Топография поверхности поликорбаната, полученная при использовании наждачной бумаги различной степени шероховатости: 180 (а), 320(б,в), 500 (г), 800 (д), 1200 (е)

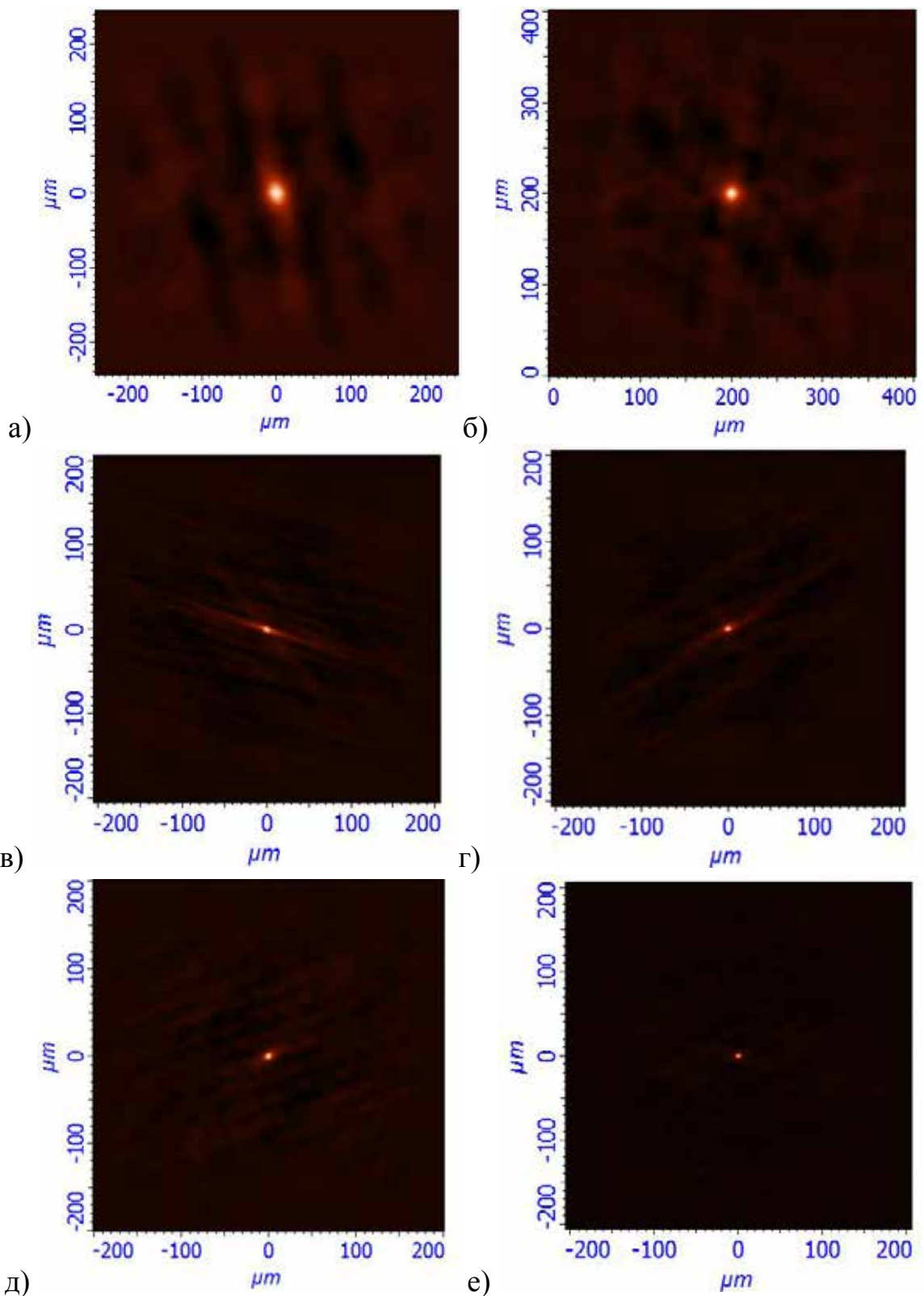


Рисунок 93 – Автокорреляционная функция поверхностей, полученных с использованием наждачных бумаг различной степени шероховатости: 180 (а), 320 (б,в), 500 (г), 800 (д), 1200 (е)

Как видно из всех представленных автокорреляционных функций, в центре каждого изображения имеется пик, размер которого задает диапазон

пространственных частот, представленных в рамках данного элемента поверхности. Данный пик или эквивалентный пик спектральной плотности мощности можно аппроксимировать различными зависимостями. Широко распространенное выражение для нормированной автокорреляционной функции имеет вид [98]:

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\xi}\right)^{2a}} \quad (48)$$

Параметр  $a$  называется экспонентой Хёрста. В случае одномерного распределения при  $a = 0.5$  соответствующая спектральная плотность описывается выражением:

$$PSD(f) = \frac{2\sigma^2\xi}{1+(2\pi f\xi)^2} \quad (49)$$

Более общий случай описывается ABC или  $k$  – корреляционной моделью [99]:

$$PSD_{ABC} = \frac{A}{(1+B^2f^2)^{C+1/2}} \quad (50)$$

В случае  $a = 1$  как автокорреляционная функция, так спектральная плотность мощности имеют Гауссов вид, причем последняя описывается выражением:

$$PSD(f) = \sqrt{\pi}\sigma^2\xi e^{-(\pi f\xi)^2} \quad (51)$$

Гауссово приближение, выраженное зависимостями (48) при  $a = 1$  и (51) представляется наиболее логичным, однако в ряде случаев пики автокорреляционных функций, представленные на рисунке 2 выглядят несимметричными, а при проведении сечения также более острыми. Подобное визуальное сравнение может быть выражено количественно, если воспользоваться для оценки нормальности распределения критерием аналогичным статистическому критерию Харке-Бера. В последнем

соответствие нормальному распределению устанавливается при помощи сверки третьего и четвертого моментов тестового распределения с нормальным. Нормированный третий момент определяется симметричностью пика, а нормированный четвертый момент определяет его остроту.

С точки зрения возможности коррекции данных индентирования учет несимметричности автокорреляционной функции как следствие наличия выделенного направления в рельефе поверхности представляется достаточно затруднительным. Данное обстоятельство связано с тем, что используемые для индентирования наконечники, выполненные в форме пирамид Виккерса или Берковича также являются неосисимметричными и подобный учет с необходимостью будет связан с определением угла между двумя выделенными направлениями – текстуры и поверхности. Данный угол необходимо было бы определять в процессе крепления индентора и контролировать в процессе крепления образца, что значительно усложняет эксперимент. Учитывая необходимость нанесения достаточно большого числа индентов для определения «настоящей» твердости материала более простым способом представляется улучшение пробоподготовки поверхности. В рамках данного рассмотрения учет несимметричности предлагается опустить, имея в виду возможность аппроксимации автокорреляционной функции симметричной зависимостью в некоторых областях лежащих выше или ниже экспериментальной зависимости, представляя некоторую усредненную по всем направлениям поверхность.

Острота пика определяется отношением центрального момента четвертого порядка  $\mu_4$  к стандартному отклонению в четвертой степени  $\sigma^4$ . Поскольку для нормального распределения данная величина равна трем, коэффициент эксцесса определяется как степень отклонения от нормального распределения:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \quad (52)$$

Для автокорреляционной функции, представленной на рисунке 93б вычисление коэффициента эксцесса в области  $\sim 25 \times 25$  мкм<sup>2</sup> в центре приводит к значению  $\gamma_{2б} = 0.2$ , аналогичное значение для рисунка 2в в области  $\sim 15 \times 15$  мкм<sup>2</sup> составляет  $\gamma_{2в} = -0.3$ . Естественно, что данные значения зависят от размера области, для которой производят вычисления; представленные выше значения примерно соответствуют размеру автокорреляционной функции. Для оценки степени адекватности обеих аппроксимации на рисунке 94 представлены оба вида аппроксимации центральной области функции, изображенной на рисунке 94а.

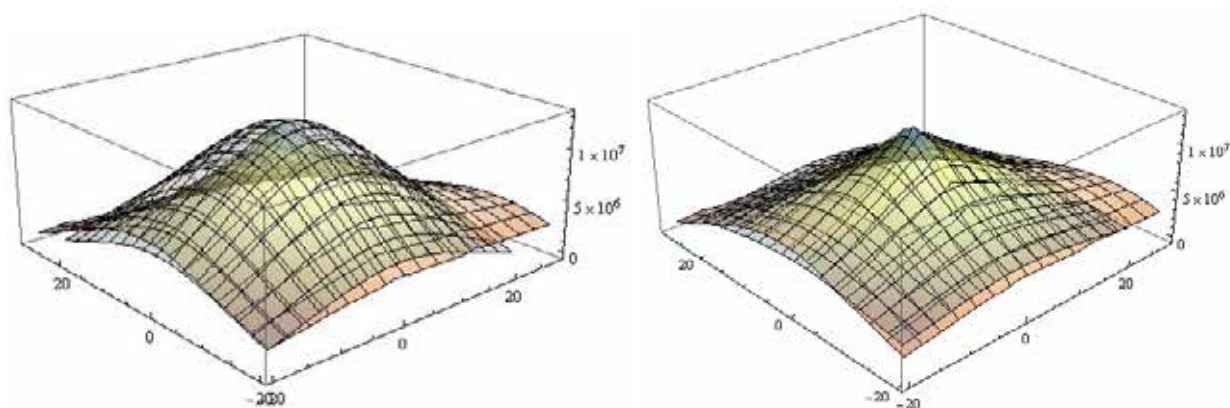


Рисунок 94 – Аппроксимация автокорреляционной функции Рисунок2а: а) функцией вида (48) с параметром  $a = 1$  б) функцией вида (48) с параметром  $a = 0.5$

В целом, можно ожидать, что автокорреляционная зависимость вида (48) при  $a = 0.5$  соответствует поверхностям, содержащим некоторую текстуру, или выделенное направление. Подобный рельеф может возникать при фрезерной и токарной обработке, а также при шлифовке поверхности. Более изотропный и нормально-коррелированный (параметр  $a$  в уравнении (48) равен 1) рельеф можно ожидать, например, при водо-абразивной обработке материалов.

Для примера возможности использования информации о автокорреляционной функции, а также данных о распределении элементов рельефа по высоте рассмотрим взаимодействие индентора с поверхностью,



обладающей нормальным распределением точек по  $z$  с стандартным отклонением  $\sigma_z$ , а также симметричной автокорреляционной функцией нормального вида с стандартным отклонением  $\sigma_{xy}$ . Поправку, связанную с влиянием шероховатости предполагается вычислить в двух предельных случаях.

В первом случае предполагается, что частота неровностей поверхности достаточно большая ( $\sigma_z/\sigma_{xy} \gg 1$ ), а глубина погружения индентора намного превышает средний разброс шероховатости. Формальным и достаточно грубым требованием может служить выполнение неравенств  $h \gg \sigma_z$  или  $r \approx 3h \gg 6\sigma_{xy}$ , где  $r$  – эквивалентный радиус пятна контакта. В таком случае можно считать, что индентер «замял» достаточно много пиков – неровностей и фактически взаимодействует с плоским участком, расположенным на уровне «средней поверхности» – аналога средней линии в профилометрии – линии вокруг которой расположены выпуклости и впадины профиля. Таким образом, ситуация сводится к модельной с той лишь разницей, что измеренная в эксперименте глубина регистрируется от момента контакта – т.е. от точки, которая может быть расположена выше или ниже «средней поверхности». Соответственно, поправка должна корректировать измеренное значение глубины  $h$  на некоторую величину  $dz$ :  $h \rightarrow h - dz$ , где  $dz$  представляется в виде  $dz = f\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{xy}}\right)\sigma_z$ .

В противоположном случае «низкой пространственной частоты» при небольших углублениях в поверхность индентер взаимодействует с долей одного пика неровности, или приводя к модельному случаю – с ровной, но наклоненной поверхностью. Такой случай также можно свести уже известным для метода инструментального индентирования зависимостям: для соответствующей коррекции необходимо заменить калибровочную зависимость функции формы площади от контактной глубины на новую зависимость, отличающуюся некоторым мультипликативным множителем:  $A \rightarrow C \cdot A$ , причем  $C$  также является функцией параметра  $\sigma_z/\sigma_{xy}$ .

Определение функции  $f\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{xy}}\right)$  можно провести на основе численного эксперимента. Для генерации массива случайных значений обладающих заданным распределением по высоте, а также пространственной корреляцией точек можно использовать как спектральную плотность мощности, так и автокорреляционную функцию. В случае автокорреляционной функции для получения искомого массива на основе его статистических свойств можно использовать следующий подход, который в начале можно продемонстрировать для более наглядного случая профиля поверхности  $Z(x)$ . Если  $F_{x_1, x_2}$  – заданная для профиля автокорреляционная матрица, а  $L$  – её «квадратный корень», получаемый в процессе разложения Холевского ( $L^T L = F$ ), то искомый массив  $Z$  может быть получен при помощи умножения матрицы  $L$  на массив нескоррелированных случайных значений  $Z_0$ , обладающих заданным распределением (в данном случае – нормальным распределением с заданным стандартным отклонением  $\sigma_z$ ). В случае поверхности  $Z(x, y)$  корреляция задается тензором  $F_{i, j, k, m}$ , а разложение можно представить в виде  $L_{ijab} L_{kmab} = F_{ijkm}$ , искомая поверхность с заданными статистическими свойствами находится из равенства  $Z_{a,b} = L_{i,j,a,b} \cdot Z0_{i,j}$ , где  $Z0_{ij}$  – также двумерный массив случайных чисел с заданным стандартным отклонением  $\sigma_z$ . Для определения соответствующей была сгенерирована серия массивов размером 128x128 точек, параметр  $\sigma_{xy}$  составил 4 точки, параметр  $\sigma_z$  был равен одной единице. В дальнейшем вертикальная координата каждого из массивов была перенормирована, так что в итоге получилось 26 значений  $\sigma_z / \sigma_{xy}$  от 0.02 до 6. Для определения  $f\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{xy}}\right)$  при каждом заданном  $\sigma_z / \sigma_{xy}$  было использовано 7500 различных массивов.

К каждому из полученных подводилась идеальная пирамида Берковича, плотность вероятности распределения нормированной

координаты касания поверхности представлена на рисунке 95. Над кривыми приведены использовавшиеся в расчете значения  $\sigma_z / \sigma_{xy}$ .

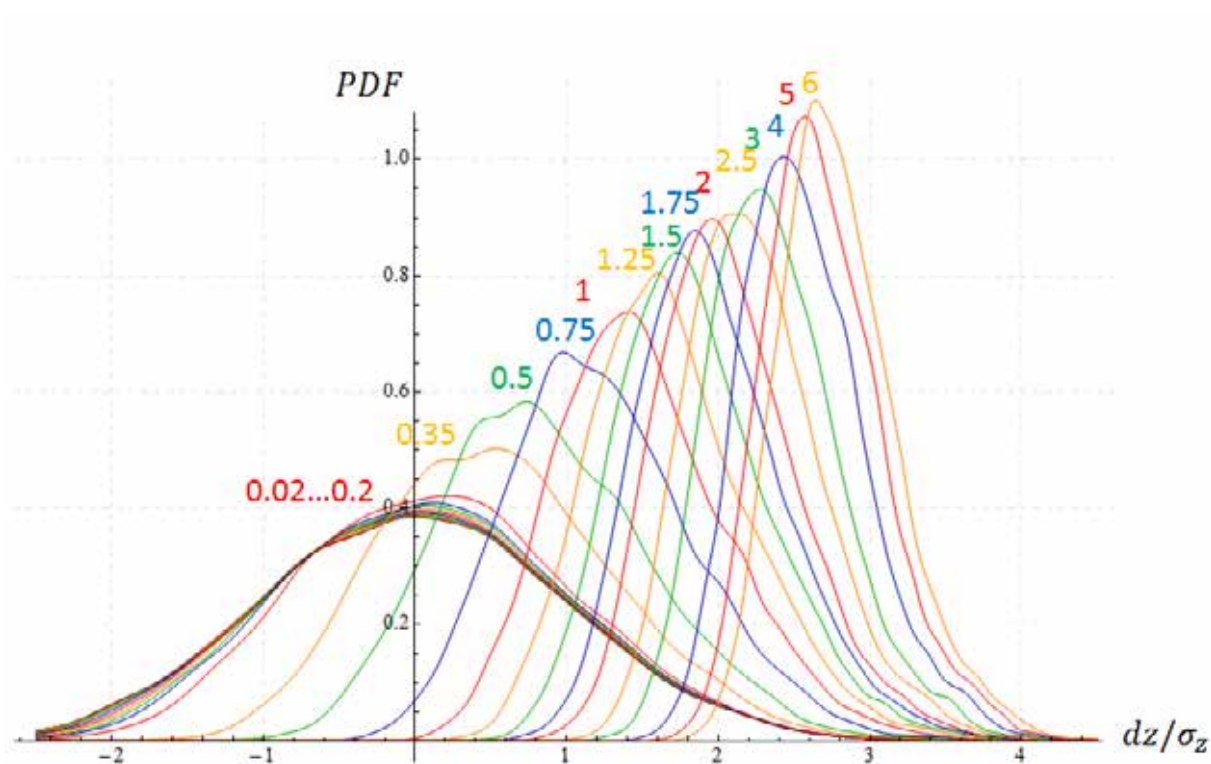


Рисунок 95 – Плотность вероятности распределения нормированной координаты касания  $dz/\sigma_z$

Для каждой из представленных на рисунке 95 кривых был произведен расчет среднего значения – центра масс кривой; зависимость данной величины  $\langle dz \rangle / \sigma_z$  от параметра  $\sigma_z / \sigma_{xy}$  приведена на рисунке 96.

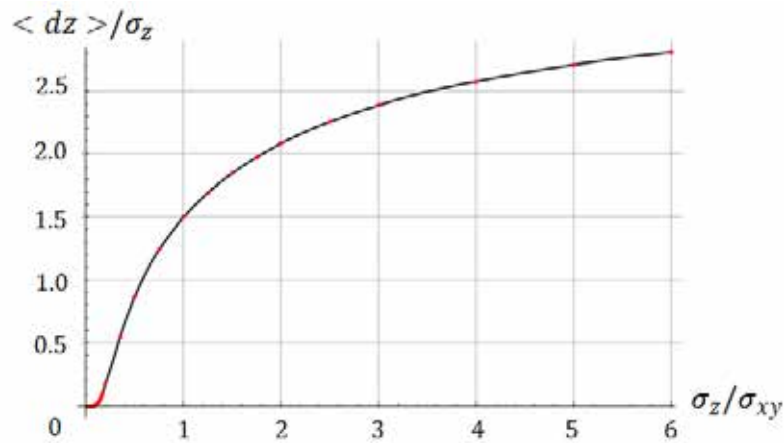


Рисунок 96 – Плотность вероятности распределения нормированной координаты касания  $dz/\sigma_z$

Представленная на рисунке 96 зависимости представляет искомую функцию  $f\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{xy}}\right)$ . Как видно из полученной зависимости при  $\sigma_z/\sigma_{xy} \lesssim 0.1$  коррекция глубины практически не нужна, в то же время как при  $\sigma_z/\sigma_{xy} \rightarrow \infty$  значения  $\langle dz \rangle/\sigma_z$  выходят на практически постоянное значение  $\approx 3$ , что вполне объяснимо с точки зрения нормального распределения и соответствует значению 2.5, использовавшимся в работе [97].

Для другого случая, связанного с влиянием наклона поверхности рассмотрим зависимость площади сечения пирамиды Берковича плоскостью, проходящей в общем случае не перпендикулярно ее высоте. Предположим, что нормаль к данной плоскости имеет углы  $\theta$  и  $\varphi$ , соответствующие сферическим координатам (полярный и азимутальный). В таком случае для заданной высоты отношение площади проекции наклонной поверхности на горизонтальную плоскость к площади проекции секущей плоскости перпендикулярной оси OZ описывается выражением:

$$\frac{A_{projection}}{A_0} = \frac{\text{Cot}[\alpha]^3}{(\text{Cot}[\alpha] + 2\text{Sin}[\varphi]\text{Tan}[\theta])(\text{Cot}[\alpha]^2 - 2\text{Cot}[\alpha]\text{Sin}[\varphi]\text{Tan}[\theta] - (1 + 2\text{Cos}[2\varphi])\text{Tan}[\theta]^2)} \quad (53)$$

На рисунке 97 представлен график данной функции. Как следует из представленного выражения, в общем случае, как это очевидно следует для

неосисимметричной фигуры, отношение площадей зависит как от угла  $\theta$  так и от угла  $\varphi$ .

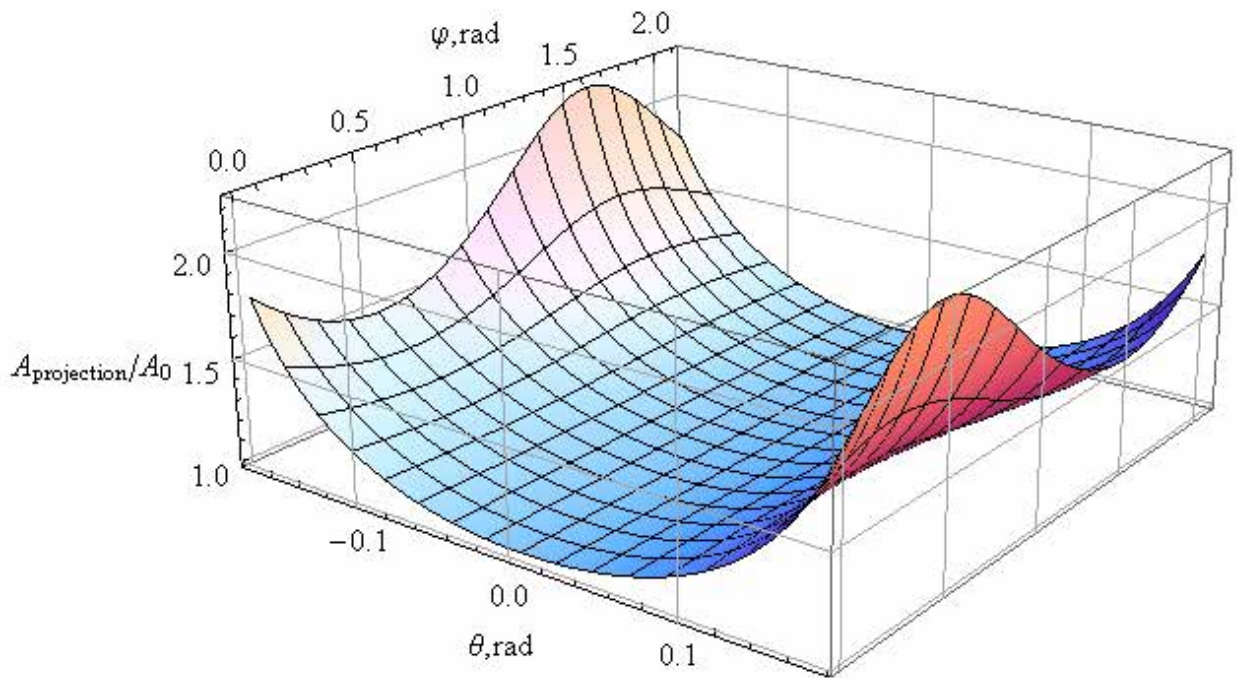


Рисунок 97 – Зависимость отношения площади проекции сечения наклонной плоскостью к площади проекции сечения площади перпендикулярной к высоте пирамиды Берковича от полярных углов

В условиях взаимодействия пирамиды с изотропной плоскостью необходимо произвести усреднение

$$\left\langle \frac{A_{\text{projection}}}{A_0}(\theta) \right\rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{A_{\text{projection}}}{A_0}(\theta, \varphi) d\varphi \quad (54)$$

Данный интеграл может быть получен с до точностью до слагаемых порядка  $\theta^2$  при малых  $\theta$ :

$$\frac{A_{\text{projection}}}{A_0}(\theta) \approx 1 + 3 \text{tg}(\alpha)^2 \text{tg}(\theta)^2 = 1 + 14.2 \text{tg}(\theta)^2 \quad (55)$$

Для применения полученного выражения на практике нужно задать между параметрами  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{xy}$  и  $\theta$ . Интуитивно можно предположить, что средний наклон поверхности определяется отношением  $\sigma_z/\sigma_{xy}$  и, таким образом, имеет место соответствие  $\text{tg}(\theta) \leftrightarrow \sigma_z/\sigma_{xy}$ . Данное предположение

подтверждается численным экспериментом, в котором пирамида в форме Берковича подводилась к поверхности и затем, без учета выдавливания материала чисто геометрически считалась площадь контакта при углублении до  $h = \sigma_z/75$  в рамках каждого единичного эксперимента было рассчитано отношение  $A_{projection}/A_0$  по четырем глубинами, полученные значения были усреднены. Каждый такой единичный эксперимент был повторен 7500 раз для каждого значения  $\sigma_z/\sigma_{xy}$ . Полученные результаты представлены на рисунке 98.

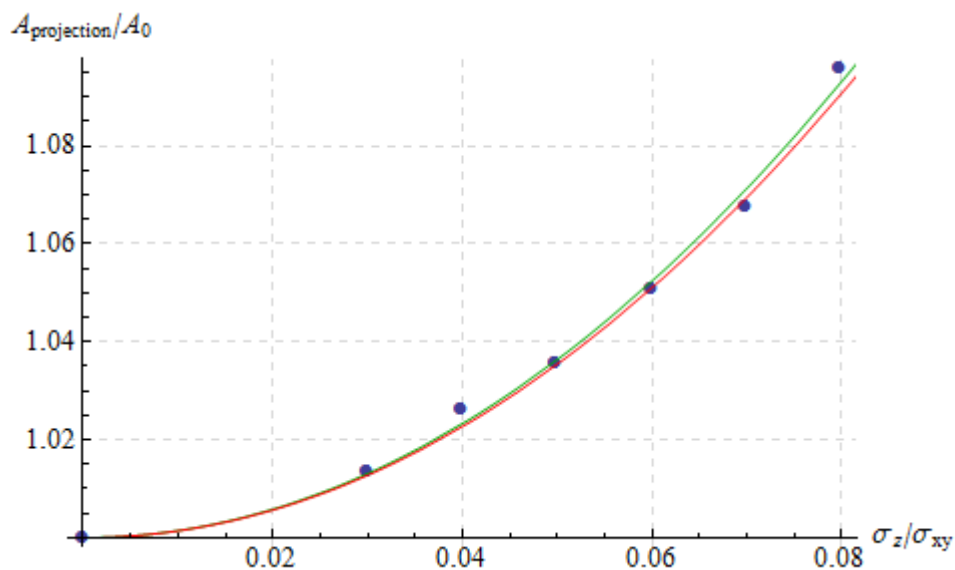


Рисунок 98 – Зависимость отношения площади проекции сечения наклонной плоскостью к площади проекции сечения площади перпендикулярной к высоте пирамиды Берковича от полярных углов

Красной линией на рисунке 98 изображена зависимость

$$A_{projection}/A_0 = 1 + 14.2(\sigma_z/\sigma_{xy})^2, \quad (56)$$

соответствующая формуле (55) при  $\text{tg}(\theta) = \sigma_z/\sigma_{xy}$ . Зеленой линией обозначена аппроксимация

$$A_{projection}/A_0 = 1 + 14.56(\sigma_z/\sigma_{xy})^2, \quad (57)$$

полученная методом наименьших квадратов. Достаточное хорошее совпадение результатов говорит о том, что представленная гипотеза является верной и для коррекции результатов инструментального индентирования в описанном выше диапазоне можно пользоваться зависимостью вида (56).

Проверка представленных подходов была произведена для образцов поликорбаната с различной степенью шероховатости. Индентирование производилось на приборе НаноСкан 4D, максимальное значение нагрузки, а также количество произведенных индентов произведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры шероховатости образцов, а также результаты измеренной и скорректированной твердости.

Параметр зернистости	Количество индентов	$\sigma_z$ , нм	$\sigma_{xy}$ , нм	$\sigma_z / \sigma_{xy}$	$F_{max}$ , мН	$\langle H \rangle$ , ГПа (без коррекции)	$H_{corr}$ , ГПа (с коррекцией)
180	101	7382	27380	0.27	100	0.1	0.18
	99				1400	0.16	0.19
320	100	1770	9720	0.18	100	0.14	0.14
	100				1400	0.18	0.18
320	64	1250	8558	0.15	10	0.15	0.15
	43				50	0.15	0.14
	22				200	0.17	0.19
500	47	950	4327	0.22	10	0.16	0.2
	45				50	0.2	0.23
	12				200	0.19	0.21
800	100	1104	4380	0.25	100	0.14	0.15
	100				1400	0.16	0.17
1200	52	500	2806	0.18	10	0.2	0.21
	26				50	0.19	0.2
	16				200	0.19	0.2

В случае индентирования поверхности, полученной при помощи наждачной бумаги с параметром зернистости 320, с нагрузкой 50 мН среднее значение твердости без коррекции 0.15 ГПа оказалось даже ближе к твердости, измеренной на гладкой поверхности 0.21 ГПа, чем скорректированное значение твердости 0.14 ГПа. Данное обстоятельство объясняется тем, что в данном случае значение без коррекции вычисляется согласно выражению  $\langle H \rangle = \frac{1}{N} \sum_i H_i$ , т.е. просто как среднее значение

твердости, в то время как скорректированное значение вычисляется как отношение силы к площади от средней контактной глубины с поправкой:  $H_{corr} = F/A_c(\frac{1}{N}\sum_i h_{ci} - \sigma_z \cdot f(\sigma_z/\sigma_{xy}))$ . Можно было бы проводить сравнение скорректированного значения также с аналогичной величиной  $\langle H \rangle = F/A_c(\frac{1}{N}\sum_i h_{ci})$ , но обычно в результатах измерения приводят именно среднюю величину твердости и поэтому сравнение было проведено именно с данной величиной.

Как результат можно отметить, что для коррекции измеряемых методом инструментального индентирования значений твердости можно произвести на основе данных о шероховатости поверхности. Для этого необходимо получить данные о рельефе поверхности при помощи атомно-силовой микроскопии, конфокальных оптических или иных методов. На основе полученной информации следует произвести вычисление статистических параметров: величине разброса высот  $\sigma_z$  и параметра автокорреляции  $\sigma_{xy}$ . С использованием полученных величин можно произвести коррекцию измеренных значений, следуя представленному выше подходу.

Кроме геометрических величин и механических, измеряемых методом инструментального индентирования, iPoRTN должен производить измерение диаграммы напряжение – пластическая деформация с производными величинами: пределом текучести, коэффициентом деформационного упрочнения, показателем деформационного упрочнения (требования п.4.2.5 ТЗ). Возможность контроля данных характеристик была исследована на приборе НаноСкан 4D, в модификации, позволяющей проводить исследования с нагрузкой до 2.5 Н. В качестве индентирующего тела сферической формы были использованы сфероконические корундовые иглы. Оптическое изображение данной иглы было получено на оптическом микроскопе Olympus VX-51 (рисунок 99). Трехмерное изображение поверхности иглы, полученное при помощи АСМ NTegra-Prima приведено на



рисунке 100 красным цветом. Зеленым цветом изображена аппроксимирующая поверхность радиуса 19.8 мкм. Синим цветом – их разница.

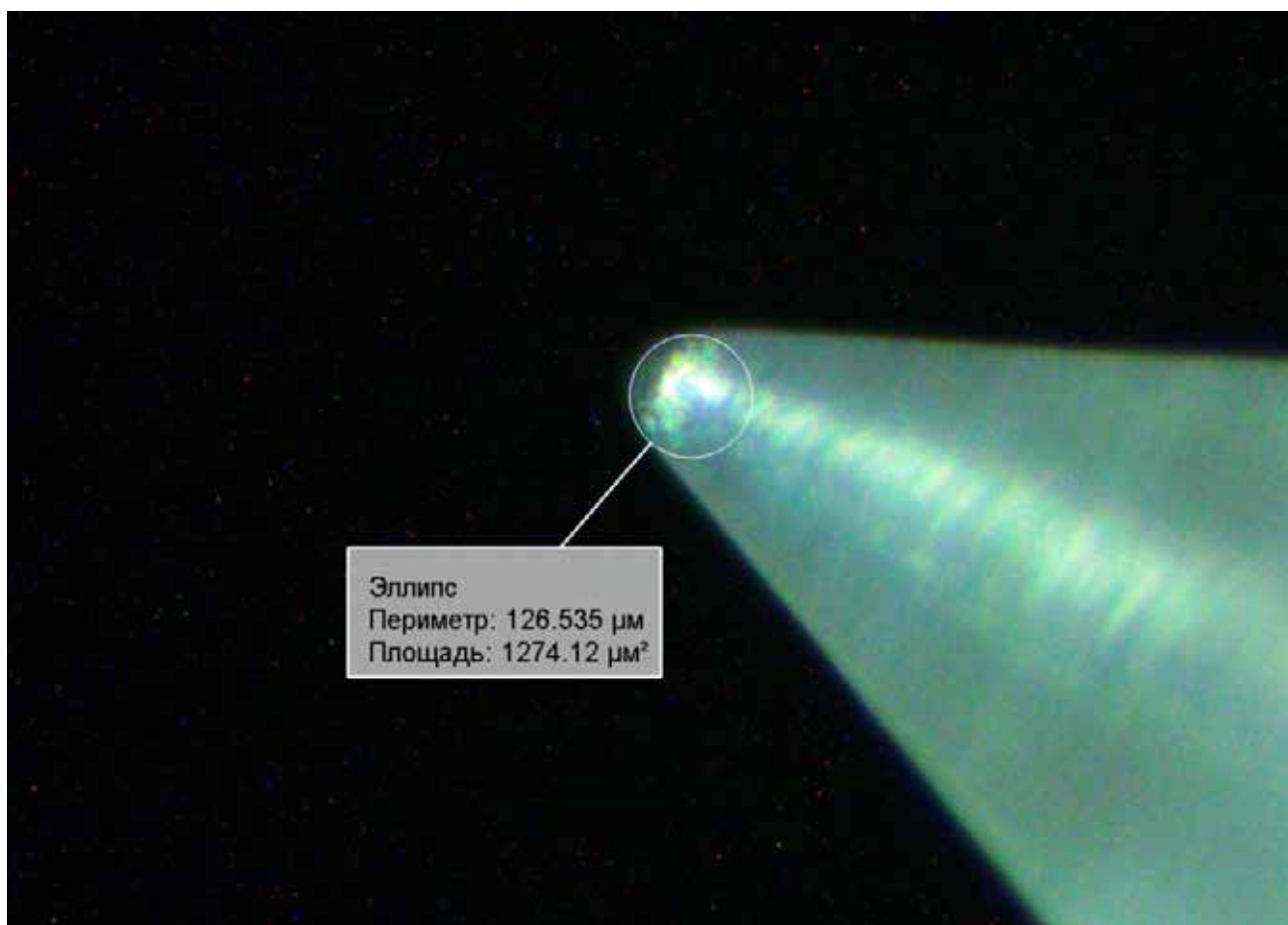


Рисунок 99 – Оптическое изображение корундовой сферо-конической иглы

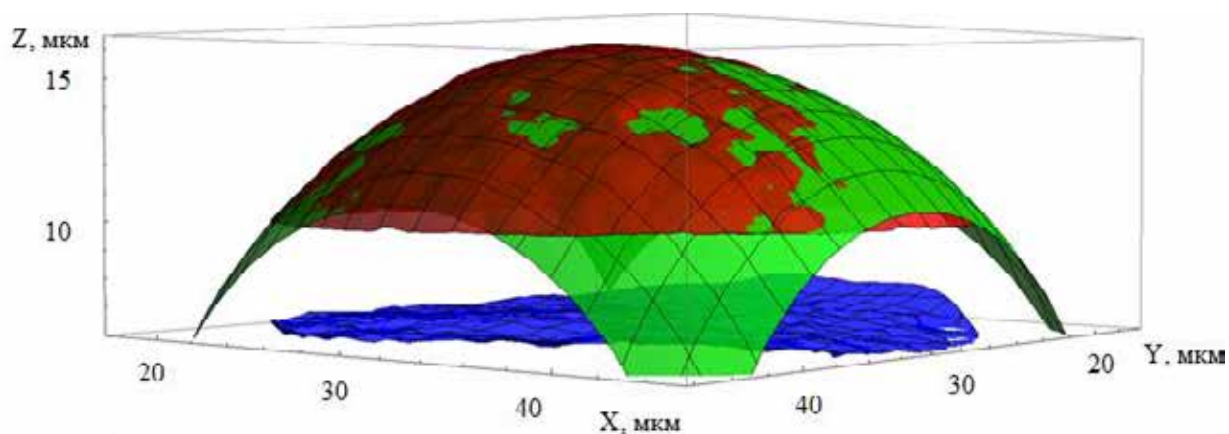


Рисунок 100 – Форма кончика поверхности иглы, полученная при помощи АСМ (красный цвет), аппроксимирующая сфера (зеленый цвет), а также их разница (синий цвет)

При помощи указанного индентора было произведено индентирование с частичной разгрузкой, пример диаграммы нагрузка – углубление представлен на рисунке 101.

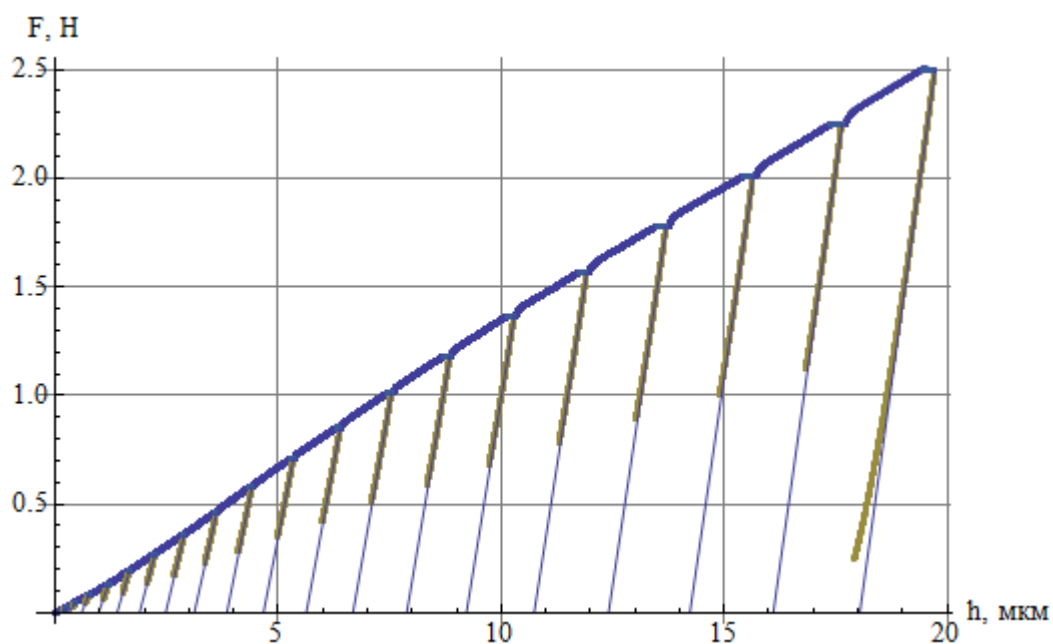


Рисунок 101 – Зависимость приложенная нагрузка – углубление, полученной при индентировании алюминиевого сплава Д16Т

В рамках каждого индента было произведено 20 циклов нагружения-разгрузки. Инденты были произведены на поверхности поликарбоната, 99% алюминия, алюминиевых сплавов АМг6 и Д16т, а также стали 40х13. Поверхности алюминиевых сплавов и стали были подготовлены при помощи механической полировки, поверхность поликарбоната была образована в процессе отливки материала. Полученные кривые были обработаны согласно уравнениям метода АВИ [22] для получения зависимости напряжения от пластической деформации. Аналогичные зависимости также были получены из результатов сжатия материалов на разрывной машине Instron 5982. Совокупность полученных кривых, изображенных на графике напряжение ( $\sigma$ ) – пластическая деформация ( $\epsilon_{\text{plastic}}$ ) приведены на рисунке 102.

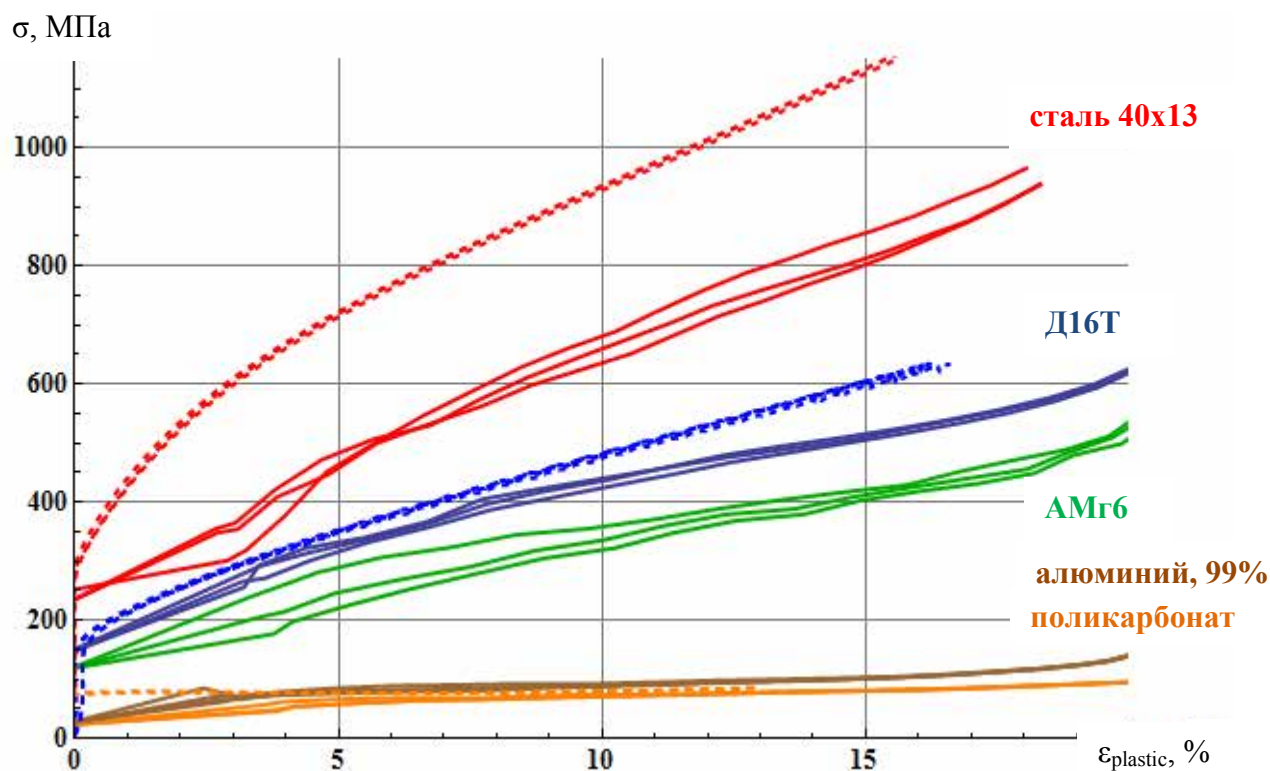


Рисунок 102 – Зависимости напряжение – пластическая деформация полученные при индентировании сфероконическим индентором (сплошные линии) и с использованием разрывной машины Instron (пунктирные линии)

Различное поведение кривых, полученных на основе метода индентирования, а также полученных с использованием разрывной машины можно связать с целым рядом факторов: методические ошибки, присутствующие в методе АВИ, несимметричность индентора, нецилиндричность сжимаемых в установке Instron образцов. Кроме того, как видно из полученных зависимостей наибольшее расхождение кривых наблюдается именно для стали - материала с наибольшим модулем Юнга из всех рассмотренных материалов. соответственно, при исследовании данного материала в наибольшей степени наблюдается эффект податливости рамы, который в частности обусловлен конечной жесткостью материала скрепляющего индентор со штоком. Жесткость всей системы обычно калибруется и учитывается, однако, подобный учет также обладает своей точностью, что также может вносить погрешность в измерения.

Для всех полученных индентов глубина измерения составляла более или порядка десяти микрометров, что значительно превышает шероховатость измеряемых образцов, поверхность которых была получена в процессе механической полировки. Примеры оптического изображения поверхности с остаточными отпечатками полученных индентов приведены на рисунке 103.

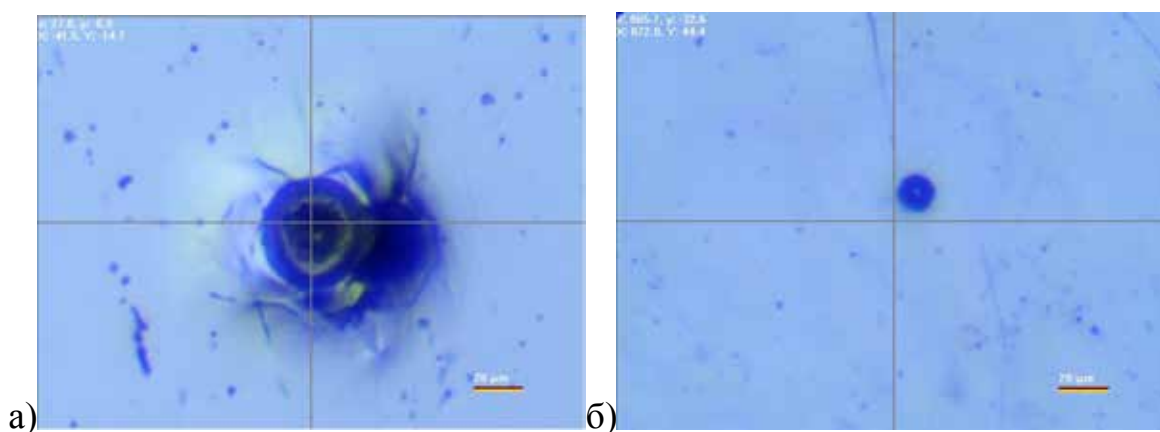


Рисунок 103 – Примеры изображений остаточных отпечатков, полученных при индентировании а) алюминиевого сплава Д16Т б) стального сплава 40х13

Измерения диаграммы напряжение – пластическая деформация были проведены как в режиме квазистатического индентирования с частичной нагрузкой – базового режима метода АВІ, так и в режиме DMA – индентирования без квазистатического нагружения, но с дополнительным осциллирующим движением, наложенным на монотонное углубление наконечника в поверхность. Данный метод не является типичным для приборов, прилагающих усилие в кН диапазоне, так как эквивалентная масса, которую можно было бы перемещать в осциллирующем режиме оказывается достаточно большой. Для приборов НаноСкан 4D указанный подход является доступным, так как резонансная частота составляет порядка 80 Гц, DMA измерения можно проводить на частоте 20 Гц. В рамках данного подхода упрощенно используемые уравнения можно записать в виде:

$$F = F_0(t) + A_F \sin(\omega t + \varphi) \quad (58)$$

$$h = h_0(t) + A_F \sin(\omega t) \quad (59)$$

$$S_{re} = A_F/A_h \cos \varphi \quad (60)$$

$$S_{re} = A_F/A_h \cos \varphi \quad (61)$$

Данные соотношения в дополнение к измеряемым значениям силы и глубины позволяют вычислять значение жесткости, необходимое по крайней мере для того, чтобы правильно рассчитать глубину с учетом податливости рамы (в случае если в системе отсутствует дополнительный сенсор). В случае, когда модуль упругости материала неизвестен, значение жесткости также используется для расчёта данной величины; в рамках данной работы модуль упругости считался заданным. Результаты проведенных измерений с использованием метода DMA представлены на рисунке 104.

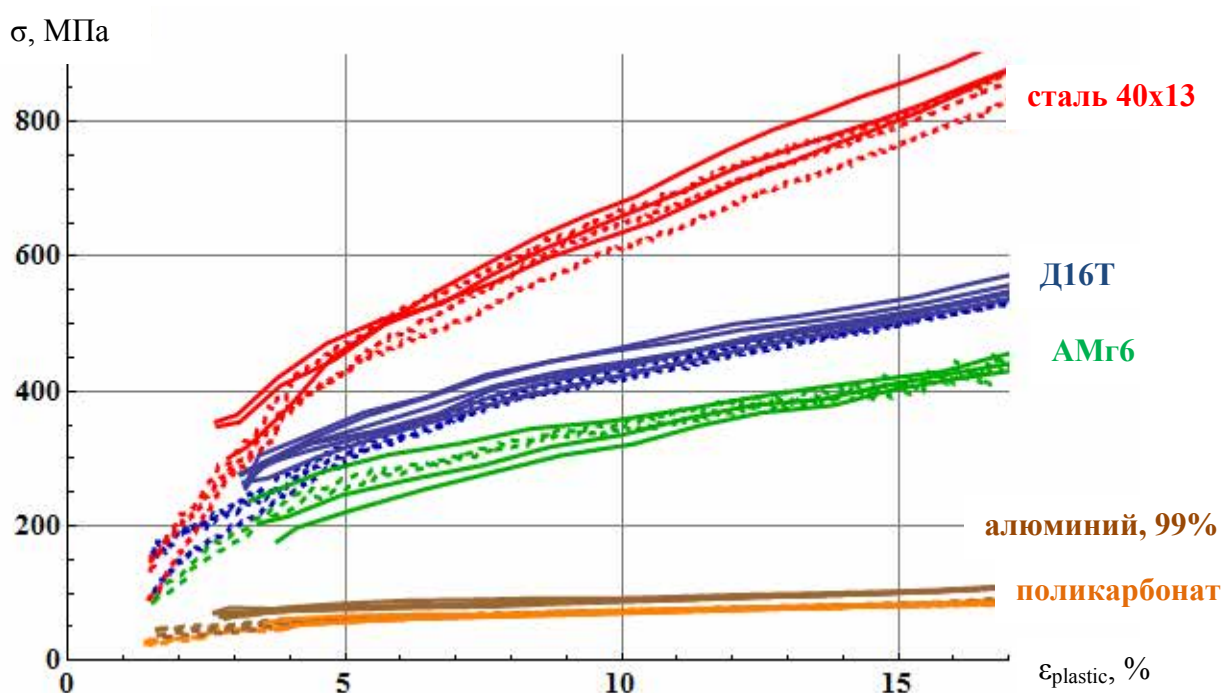


Рисунок 104 – Диаграмма напряжение – пластическая деформация, полученная при помощи метода АВІ с использованием частичной разгрузки (а) и метода DMA (б)

Данные рисунка 104 демонстрируют хорошее соответствие между результатами, получаемыми с использованием обоих предложенных методов. Существующий разброс измеренных данных можно связать с влиянием термодрейфа и в меньшей степени с влиянием шероховатости поверхности. В

противном случае следовало бы ожидать уменьшение разброса данных с увеличением глубины индентирования, что наблюдается в некоторой степени для сплава АМгб и практически не наблюдается для стали 40х13.

### **Результаты и выводы раздела**

Шероховатость образцов влияет на измеряемые значения как твердости и модуля упругости так и диаграмму напряжение-пластическая деформация, добавляя не только случайный разброс, но и смещая оценку средней величины. Возникающая ошибку измерения твердости можно скорректировать, измеряя статистические параметры поверхности: радиус автокорреляционной функции  $\sigma_{xy}$ , а также стандартное отклонение распределения высот  $\sigma_z$ . В зависимости от типа обработки поверхности (например, фрезеровка, шлифовка или пескоструйная обработка) автокорреляционную функцию можно аппроксимировать различными зависимостями, определяющими вид корректирующей функции. Корректировка возможна в двух предельных случаях, которые грубо можно по сравнению эквивалентного радиуса отпечатка  $r$  с параметром корреляции  $\sigma_{xy}$ :  $r \gg \sigma_{xy}$  и  $r \ll \sigma_{xy}$ .

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.10 ПГ и п.3.10 ТЗ.

## 11 Проведение экспериментальных исследований с целью обоснования и выбора материалов для изготовления элементов конструкции экспериментального образца iPoRTH

Экспериментальный образец iPoRTH состоит из целого ряда элементов, значительная часть которых может изготавливаться из материалов с известными свойствами, не требую дополнительных экспериментальных проверок. Для компонентов электроники в рамках выполняемой работы отсутствуют требования к функционированию в при излучении или в экстремальных условиях, поэтому они изготавливаются из стандартных кремниевых элементов. Ряд модулей, таких как например оптический микроскоп является интегрируемыми в состав прибора в виде законченных изделий, что также снимает вопрос выбора материала для изготовления. С точки зрения разрабатываемого модуля, результаты расчета которого приведены в разделе 1.5, возникает ряд требований к прочностным характеристикам элементов, однако и в данном случае экспериментальная проверка в условиях, когда произведен расчет и свойства конструкционных материалов известны, требуется далеко не везде. Так в соответствии с результатами расчета, даже при максимальном усилии в 3 кН типичные значения напряжений в корпусе составляют несколько десятков МПа. Подобное напряжение могут выдержать не только стали и алюминиевые сплавы, но также и полимеры (например, поликорбанат), и даже некоторые пластики. Большим значением предела текучести должны обладать силовая ячейка – датчик силы, но в соответствии с результатами моделирования известно, что в рамках предложенных геометрических размеров в качестве материала может быть использована как сталь (например, 40х13) так и алюминиевые сплавы. Исходя из результатов данного расчета, также можно заключить, что для изготовления мембран датчика перемещения вполне допустимым и достаточным решением является использование пружинистой стали 36нхтю.

Отдельным важным вопросом, является выбор материала для крепления индентора. На сегодняшний день существуют достаточно количество предложений готовых конструкций держателей сферических инденторов, например, запрессованных в сталь. Вместе с тем, исходя из данных литературного обзора, представленного в разделе 1, можно заключить, что возможность построения диаграммы до больших значений пластической деформации  $\epsilon$  в случае сферических инденторов определяется возможностью погружения шарика на достаточные глубины, в предельном случае на глубину, равную радиусу. Подобная возможность отсутствует у представленных на рынке держателей, в которых сфера запрессована больше чем на половину. Кроме того, использование стального держателя с твердым керамическим шариком в случае индентирования материалов тверже чем держатель, но мягче чем материала шарика при достаточных углублениях приведет к тому, что индентировать будет сам держатель вместо тестового образца, что исключает возможность корректного измерения свойств тестируемого материала.

Для исследования возможности изготовления твердосплавного держателя индентора, позволяющего измерять свойства материала до больших значений пластической деформации было изготовлено 4 образца из твердого сплава ВК.

Были изготовлены цилиндрические опоры для керамического шарика диаметром 1 мм из твёрдого сплава ВК6 и ВК15 (Рисунок ). Шарик диаметром 1 мм был выбран для данных испытаний так как при нагрузке в 3 кН он погружается на глубину больше радиуса в большинство сплавов используемых при производстве труб. Шарики большего диаметра при данной нагрузке нагружаются на глубину меньше радиуса шарика. Давление на твердосплавные опоры будет меньше. Испытания на шарике 1 мм будут показательны и для шариков большего диаметра. Шарики диаметром менее 1 мм углубляются на глубину радиуса при меньшей нагрузке и при индентировании, имеют на опоре такое же среднее давление как с шариком 1

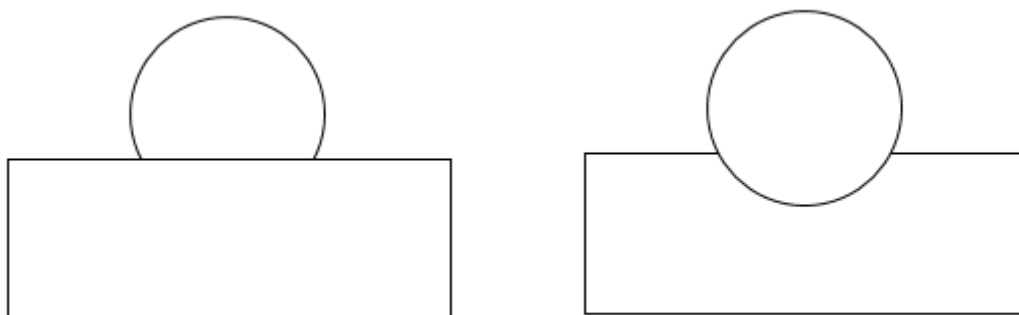


мм. Испытания на шариках диаметром 1 мм покажут возможность использования твердосплавных опор для шариков других диаметров предусмотренных ТЗ, рисунок 105.



Рисунок 105 — Твердосплавные опоры ВК6

Предложено два способа крепления шарика к твердосплавной опоре. Первый вариант — сформировать плоский участок на шарике по хорде и положить сточенный шарик на плоскую опору (рисунок 106а). Вторым вариантом — выточить в твёрдом сплаве сферическую лунку и расположить в неё шарик (рисунок 106б). Были испытаны оба варианта.



а)

б)

Рисунок 106 — схема крепления шарика на опору, а – шарик с лыской, б – шарик в лунке

Испытания на сжатие были проведены на испытательной машине Instron 5965. Испытание заключалось в сжатии твёрдосплавной опоры и

шарика. Прижатие шарика к плоской опоре из твёрдого сплава приводит к сколу керамического шарика при нагрузке 600 Н, что сильно меньше требуемой для работы прибора (рисунок 107).

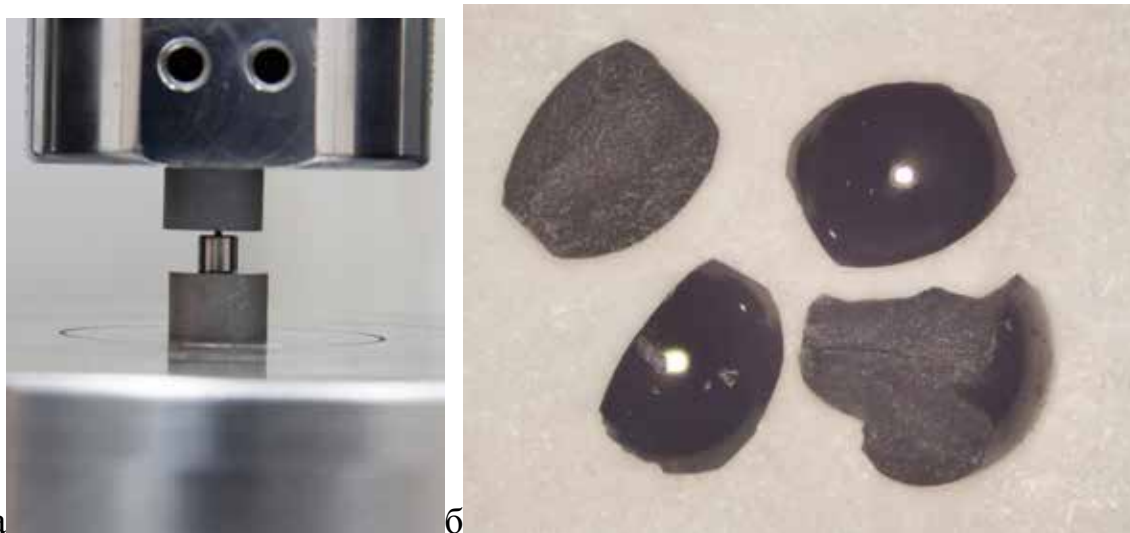


Рисунок 107 — а) сжатие шарика между двумя твёрдосплавными опорами, б) сколотый шарик

Для предотвращения скола шарика и приведения эксперимента к условиям работы будущего прибора в качестве верхней опоры (образца) был выбран кубик из легированной стали. Рисунок 108 показывает пример всех последующих экспериментов. При испытании поддерживалась постоянная скорость перемещения равная 200 мкм/мин. Все испытания проводились с преднагрузкой 50Н. Остановка эксперимента проводилась при достижении нагрузки в 3 кН или резком изменении силы нагружения. Нагрузка резко меняется при хрупком разрушении образца или при касании верхней опоры твёрдосплавной опоры.

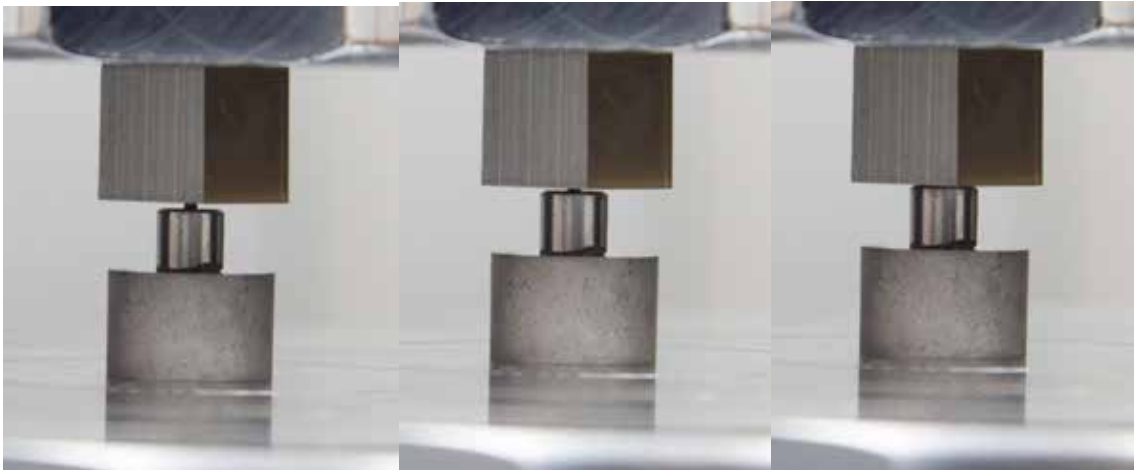


Рисунок 108 – испытание на сжатие в испытательной машине

На рисунке 109 показаны используемые в эксперименте два вида керамических шариков из нитрида кремния: со сточенной стенкой (лыска) и без неё.



Рисунок 109 — шарики 1мм перед испытанием, а) с лыской, б) сферическая

Для изучения влияния керамического шарика на опору были проведены испытания на сжатие без приклейки образца. Поверхность опоры изучалась на оптическом микроскопе и профилометре.

Испытания шарика с лыской показали, что разрушение образца возможно при сжатии на нагрузку менее 3 кН. На рисунке показаны шарик, разрушившийся при нагрузке 2600Н. На рисунке 110 показана фотография

шарика после испытания на сжатие, который в результате испытаний оказался запрессованным в стальной образец. По всему периметру прижимной площадки видны сколы.



Рисунок 110 — шарик, сколотый по краям плоской лыски

На рисунке 111 показана поверхность твердосплавной опоры после испытания сточенного шарика. Видно, что на материале подложки также возникают сильное напряжение материала, приводящее к его разрушению.

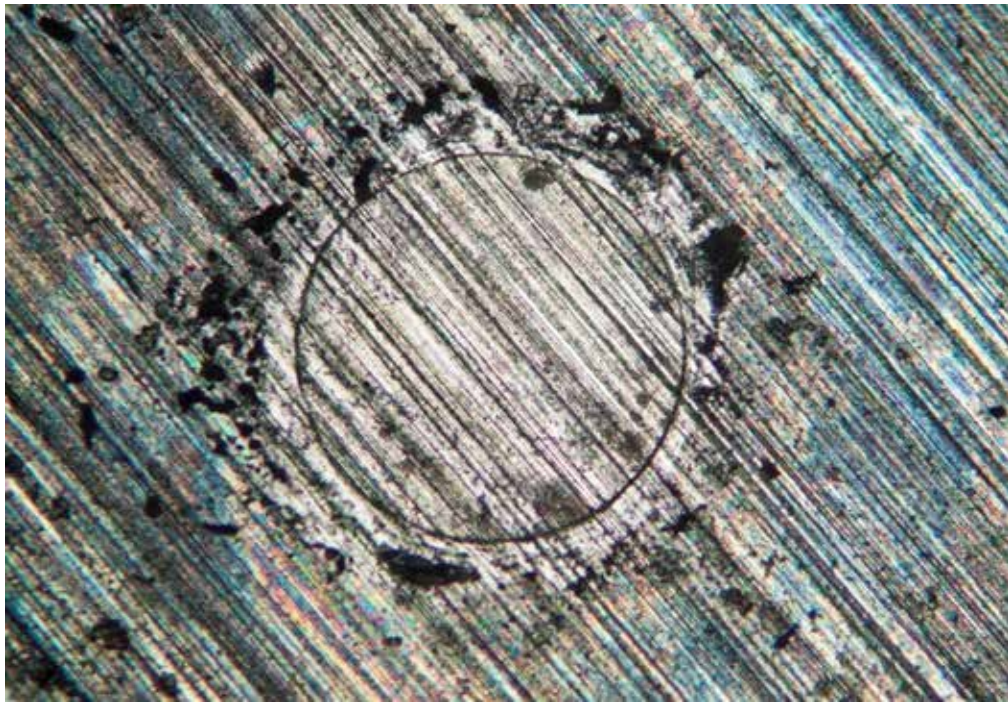


Рисунок 111 — поверхность твердосплавной опоры после испытания по схеме 1

Полученный результат является вполне ожидаемой как с точки зрения известных теоретических зависимостей, так и с точки зрения качественного рассмотрения. Граница лыски, касающаяся плоской поверхности, фактически представляет острый край, на котором следует ожидать возникновения больших напряжений. В силу того, что твердость карбида кремния превышает твердость сплава ВК в данном месте возникает отпечаток. Достаточно точным приближением представленной ситуации является случай взаимодействия плоского штампа с полубесконечным плоским пространством. Как известно [100], для случая контакта без трения контактное давление  $p(r)$  стремится к бесконечности в области края контакта согласно зависимости

$$p(r) = \frac{F}{\pi(R^2 - r^2)^{1/2}}$$

Наличие трения приводит к изменению данной зависимости, которая приобретает вид:

$$p(r) = \frac{F \cos(\pi\gamma)}{\pi(R^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{R + r}{R - r} \right)^\gamma$$

где

$$\operatorname{ctg}(\pi\gamma) = -\frac{2(1 - \nu)}{\mu(1 - 2\nu)}$$

Символами  $\mu$  и  $\nu$  обозначены коэффициенты трения и Пуассона. Обе представленных выражения показывают, что на краю контакта плоского штампа возникает бесконечное контактное давление. Естественно, что в условиях реального эксперимента край плоской лыски не является идеально острым и величина контактного давления конечна и, кроме того, следует ожидать отклонения давления от представленных зависимостей с развитием пластической деформации. Вместе с тем представленные зависимости качественно предсказывают полученный экспериментально результат: большие напряжения по периметру контакта приводят к разрушению индентирующего тела (рис. 110). Таким образом, использование шарика с лыской в качестве индентора не является оптимальным решением.

Также были проведены испытания шарика расположенного в лунке твёрдосплавной опоре (рисунок 112).



Рисунок 112 — шарик в лунке твердосплавной опоры

При помощи установки бесконтактного нерзрушающего контроля микрогеометрии методами конфокальной профилометрии (профилометра) была измерена форма лунки до и после испытаний.

Данные о профилях и осмотр микрофотографий показали отсутствие изменений в форме опоры. Примеры профилей поверхности с аппроксимирующей кривой, полученные до и после испытаний на вдавливание представлены на рис. 113.

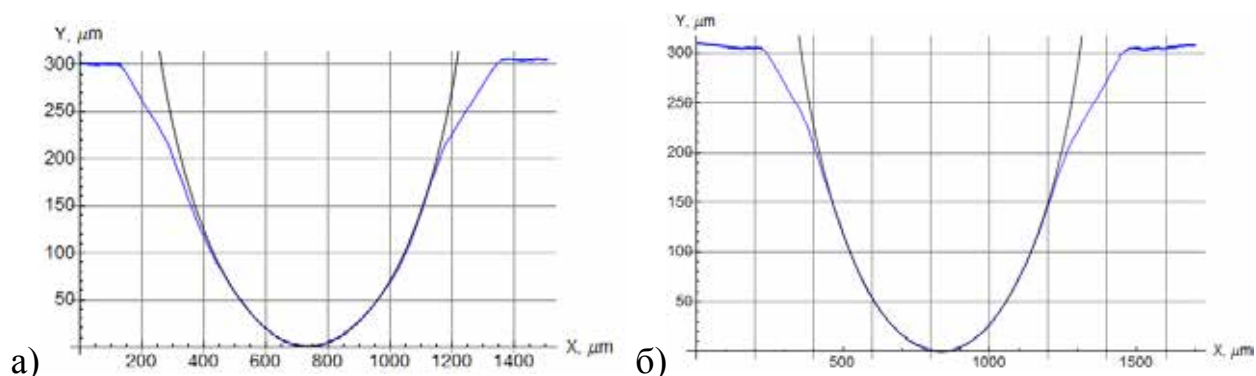


Рисунок 113 – Профиль поверхности лунки в опоре до (а) и после (б) вдавливания шарика

Радиус кривизны лунки до вдавливания составил 0.527 мм, после вдавливания: 0.525 мм, что говорит об отсутствии пластической деформации поверхности во время испытаний. На рисунке показан шарик,

запрессованный в стальную опору после испытания. Поверхность, бывшая в контакте с твердосплавной опорой, не имеет следов разрушения.

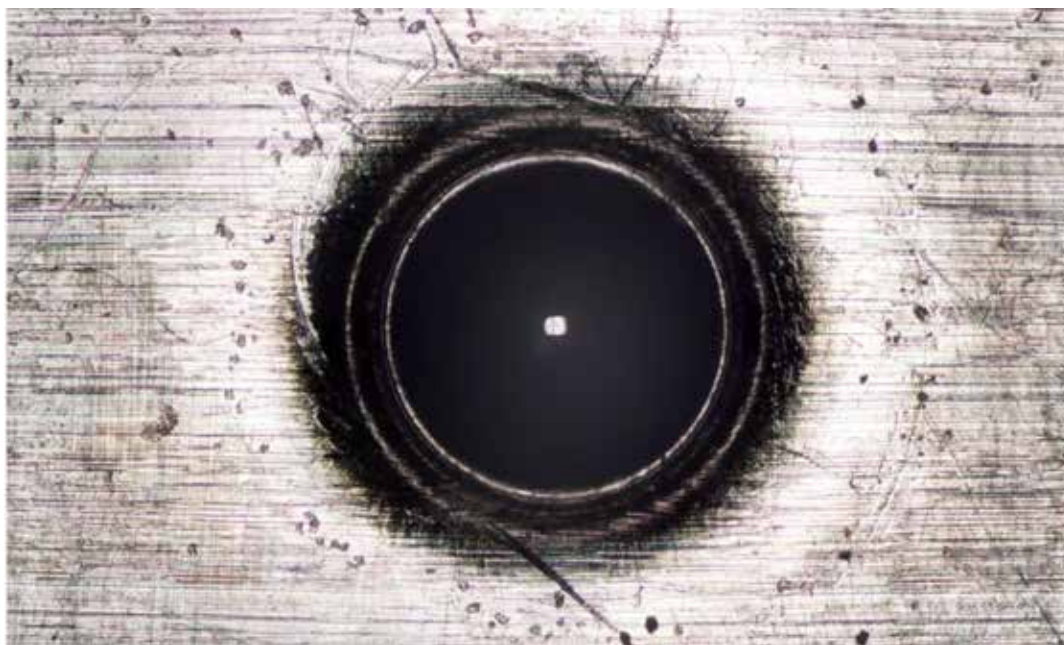


Рисунок 114 — шарик, запрессованный в стальной образец

Таким образом, испытания показали, что данный метод позволяет нагрузить шарик без лыски до нагрузки 3 кН без разрушения керамического шарика и опоры.

Следующие эксперименты проводились для испытания методов крепления шарика внутри сферической лунки, рисунок 114. Были испытаны два клея для крепления шарика—на основе цианакрилата и эпоксидной смолы. Клей на основе цианакрилата выдержал только одно испытание. Повторное испытание сжатием вырвало шарик из лунки. Рисунок 115 показывает диаграмму вдавливания на испытательной машине.



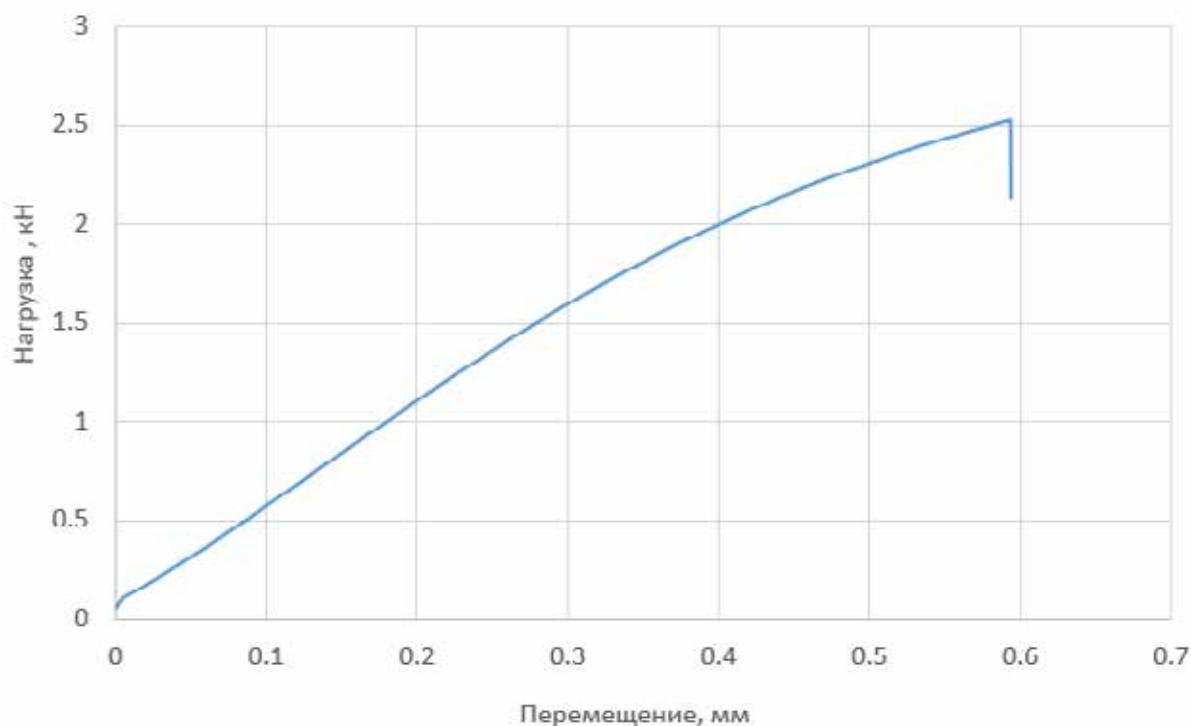


Рисунок 115 — Испытание на сжатие шарика в лунке с клеем на основе цианакрилата

На диаграмме нагружения виден скачок по силе связанный с хрупким разрушением на границе клея и твердосплавной опоры. В тоже время отрыва клея от шарика не наблюдается. Рисунок 116 показывает шарик после испытаний, запрессованного в стальную опору со слоем клея на поверхности. Видно, что клей расположенный на шарике, покрывает большую его поверхность и покрыт неравномерно. Наибольшая толщина клея располагается по периметру. Адгезии клея к поверхности лунки недостаточно для удержания шарика в опоре.



Рисунок 116 — шарик, запрессованный в опоре со слоем клея на основе цианакрилата

Твердосплавная опора с шариком приклеенным на эпоксидную смолу выдержала серию из трёх испытаний на сжатие с внедрением на глубину превышающую радиус шарика (нагрузка близкая к 3 кН). Сравнение диаграмм внедрения с клеем и без клея (рисунок 117) не выявили значительного влияния слоя клея на испытания. Вероятно, что слой эпоксидного клея достаточно тонкий, чтобы его деформация не сказалась на результат проводимых измерений.

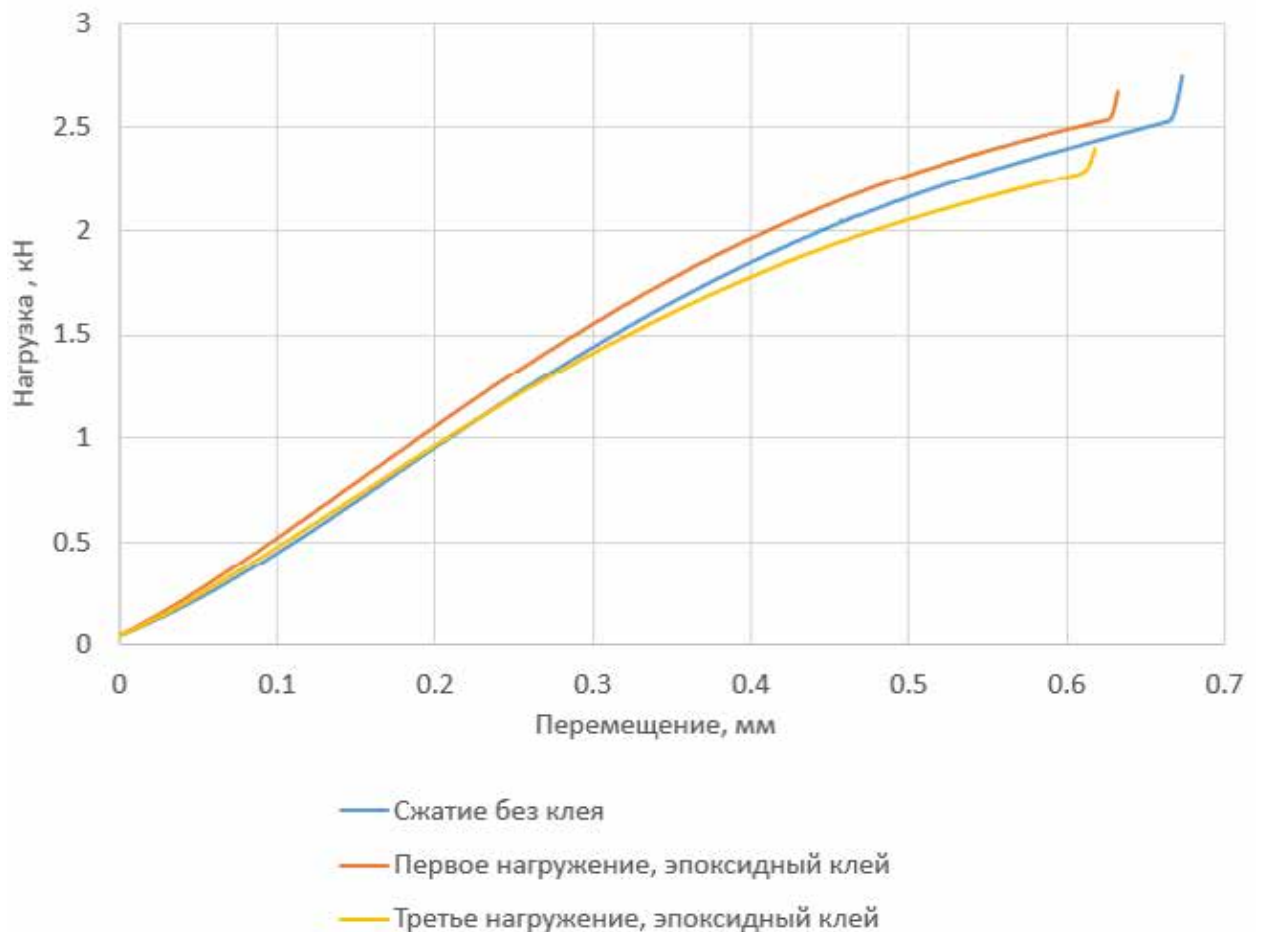


Рисунок 117 — Испытание на сжатие шарика в лунке с эпоксидным клеем и без него

Разница в использовании сплавов ВК6 и ВК15 не обнаружена. Проведённые эксперименты показали, что опоры из сплавов ВК6 и ВК15 можно использовать как элемент держателей инденторов с шариками. Лучшим способом крепления шарика к опоре является приклейка шарика внутри сферической лунки на эпоксидный клей. Ожидается что количество клея, время отвердевания может сказаться на работе прибора. Испытания способа крепления опор, подбор марки эпоксидного клея, влияния жесткости клея на погрешность измерения деформации, будут проведены после полной сборки прототипа прибора с работающей системой управления и реализованными методиками испытаний.

## **Результаты и выводы раздела**

Для большинства элементов конструкции iPoRTH материалы являются либо стандартными, либо выбираются из набора известных конструкционных материалов, требования к которым определяются результатами численного моделирования. В рамках работы, представленной в данном разделе, был произведен выбор материалов для изготовления держателя индентирующего наконечника. С целью увеличения диапазона измеряемых материалов и допустимых деформаций традиционный способ крепления твердосплавного шара в сталь предлагается заменить креплением в твердосплавный держатель, выполненный из сплава ВК, в котором присутствует небольшая лунка для крепления шара. Проведенные эксперименты показали возможным способом крепления держателя и шара при помощи эпоксидного клея, в то время как использование цианакрилата в качестве связующего материала является недопустимым.

Результаты, полученные в ходе работ, описанных в данном разделе, были доложены на 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ (мероприятие по популяризации науки).

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.11 ПГ и п.3.11 ТЗ.

12 Разработка компоновки основных радиоэлектронных узлов и проведение моделирования электронной схемы управления измерительным модулем, вычислительного блока обработки данных, схемы электропитания и модуля беспроводной цифровой связи

Работы данного раздела выполнены соисполнителем работы – обществом с ограниченной ответственностью «РЭА-Т».

### 12.1 Компоновка основных радиоэлектронных узлов

При конфигурации системы управления портативного твердомера был реализован гибридный подход. Это значит, что часть алгоритмов управления работой реализованы в высокоуровневом программном обеспечении, исполняемом в персональном компьютере, а другая часть в микроконтроллерной системе, находящейся в приборе. Компоновка электрических узлов устройства выполнена следующим образом. В измерительном модуле расположены датчик измерения силы, датчик перемещения зонда и линейный актюатор. Кабелями измерительный модуль связан с основным блоком электроники, в котором расположены блоки питания, аналоговые платы обработки сигналов, цифровая микроконтроллерная плата, контроллер линейного актюатора и модуль беспроводной передачи данных. Портативный твердомер имеет возможность автономной работы от внешнего аккумулятора. Соединительные кабельные сборки должны иметь длину (1.5-2) м и быть выполненными из проводников, находящихся в индивидуальных заземленных экранах. Корпусы измерительного модуля и блока электроники так же должны быть выполняться из проводящего материала и выполнять функцию экранировки электронных компонентов от электромагнитных помех. Блок электроники может подключаться к персональному компьютеру по интерфейсу USB или по интерфейсу беспроводной передачи данных.

На рисунке 118 изображена структурная схема компоновки основных радиоэлектронных узлов портативного твердомера. Блок сопряжения представляет собой основную, «материнскую» плату. На нее через двухрядные гребенчатые разъемы PBD-40 устанавливается блок управления, представляющий собой плату, содержащую микроконтроллер, микросхемы памяти и обвязку. Через двухрядные гребенчатые разъемы PBD-80 в блок сопряжения устанавливаются блоки детектирования, представляющие собой платы, содержащие цифровые генераторы зондирующих колебаний, аналоговые тракты обработки сигналов и микросхемы аналогово-цифровых преобразователей. Блок сопряжения имеет формат mini-ITX и может быть установлен в любой корпус, имеющий аналогичное исполнение. Блок беспроводной связи интегрирован в блок сопряжения.

Блок питания MDR-100-24 расположен внутри корпуса основного блока электроники и соединены с блоком сопряжения кабельной сборкой. Блоки питания КАМN3012 интегрированы в блок сопряжения. Линейные регуляторы напряжения TPS7A4901DGNT и TPS7A3001DGNT установлены непосредственно в блоках детектирования. Внешний аккумулятор, используемый для электропитания прибора в автономном режиме работы, подключается к основному блоку электроники через сетевой разъем.

Далее приведены сборочный чертеж и принципиальная электрическая схема блока сопряжения.



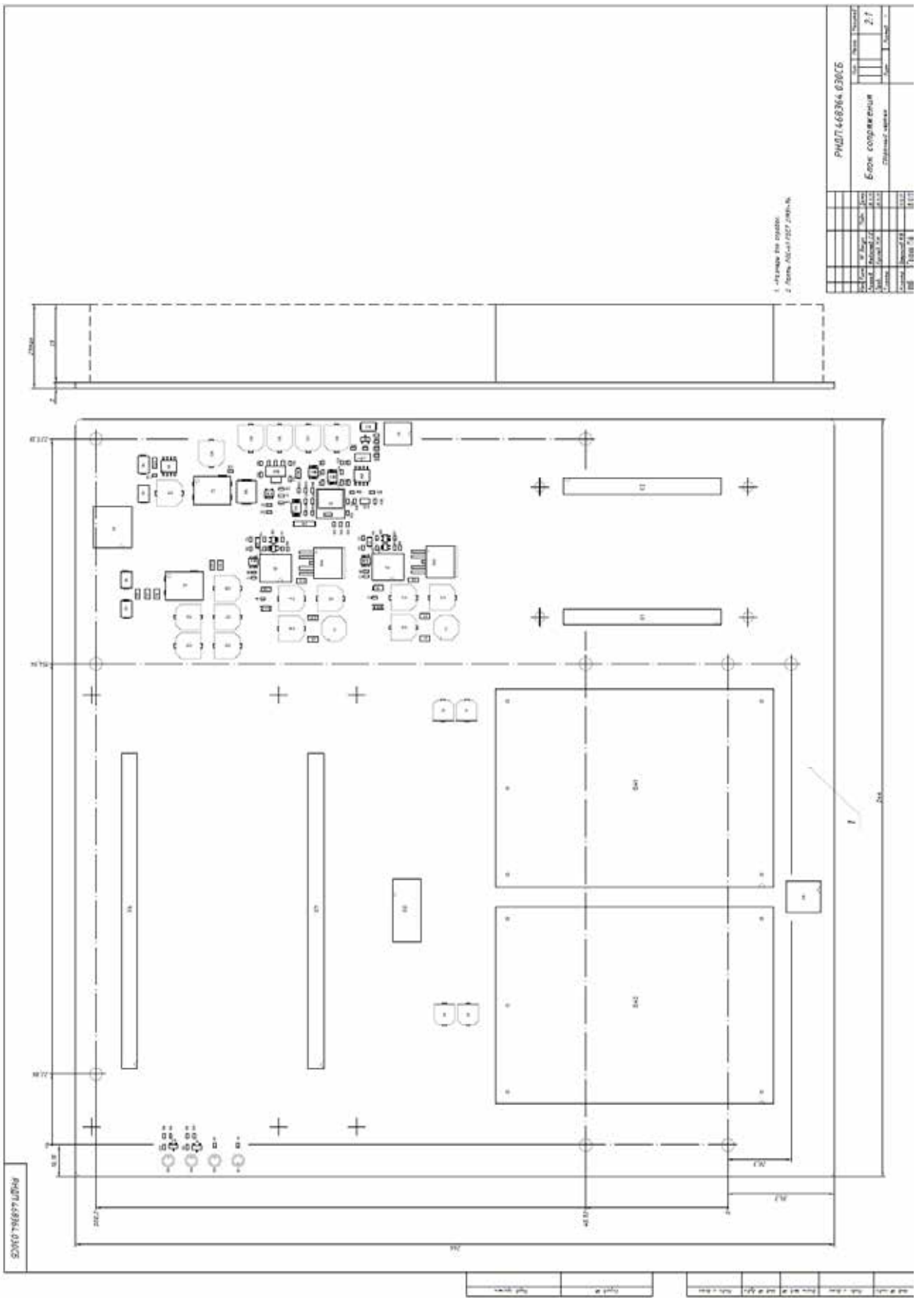


Рисунок 119 – Сборочный чертеж блока сопряжения



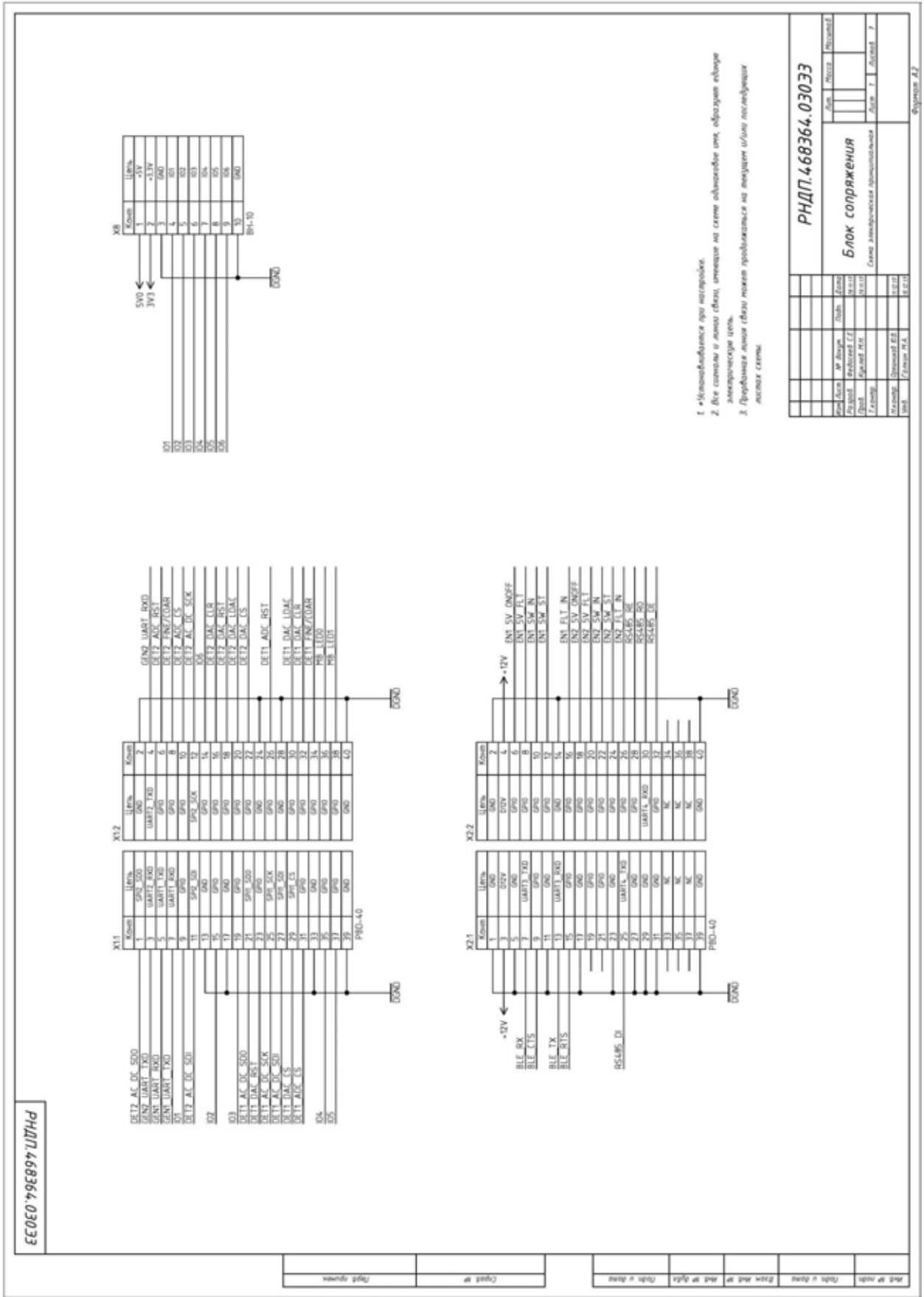


Рисунок 120 – Схема электрическая коммутационная принципиальная блока сопряжения

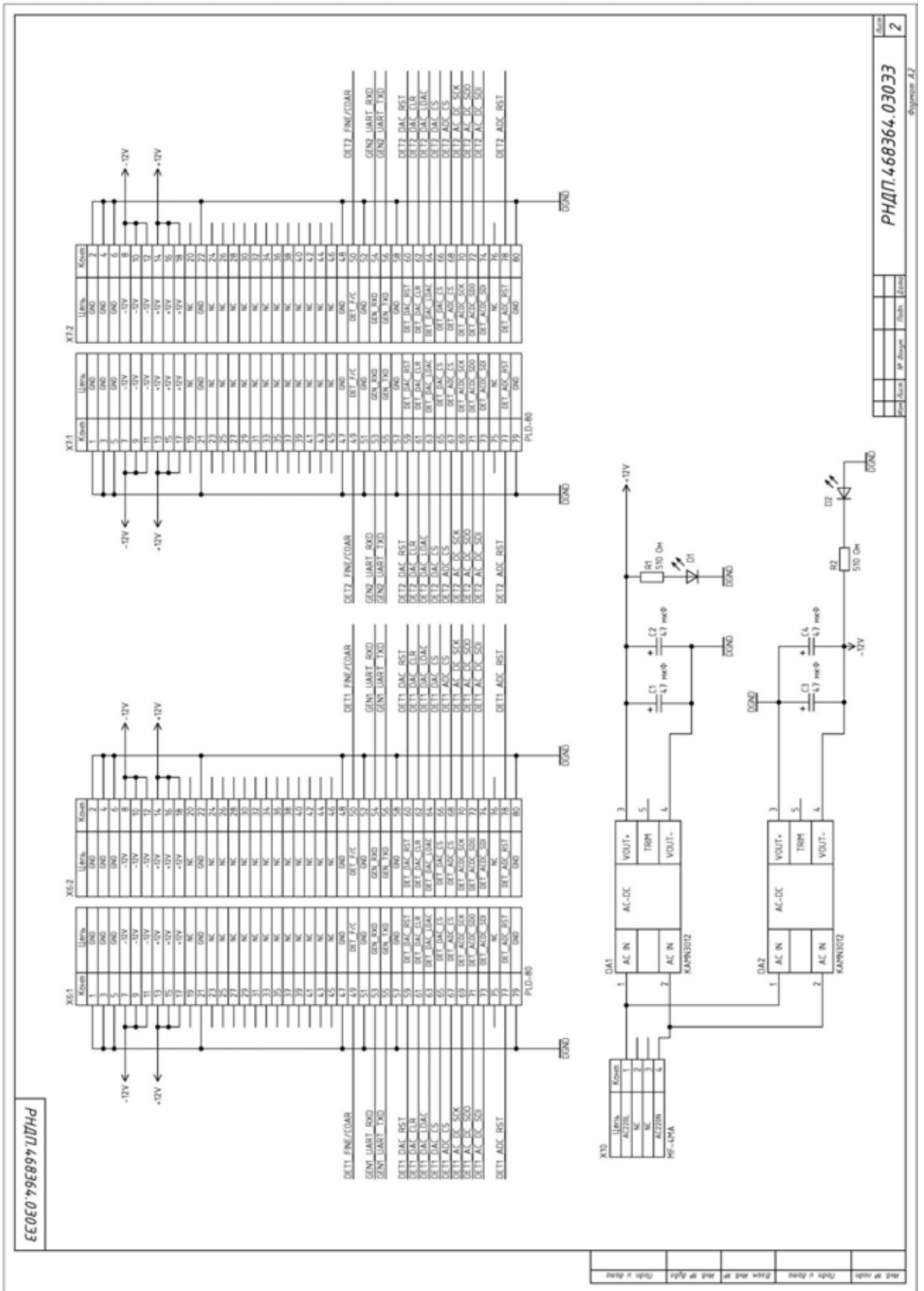


Рисунок 121 – Схема электрическая коммутационная принципиальная блока сопряжения

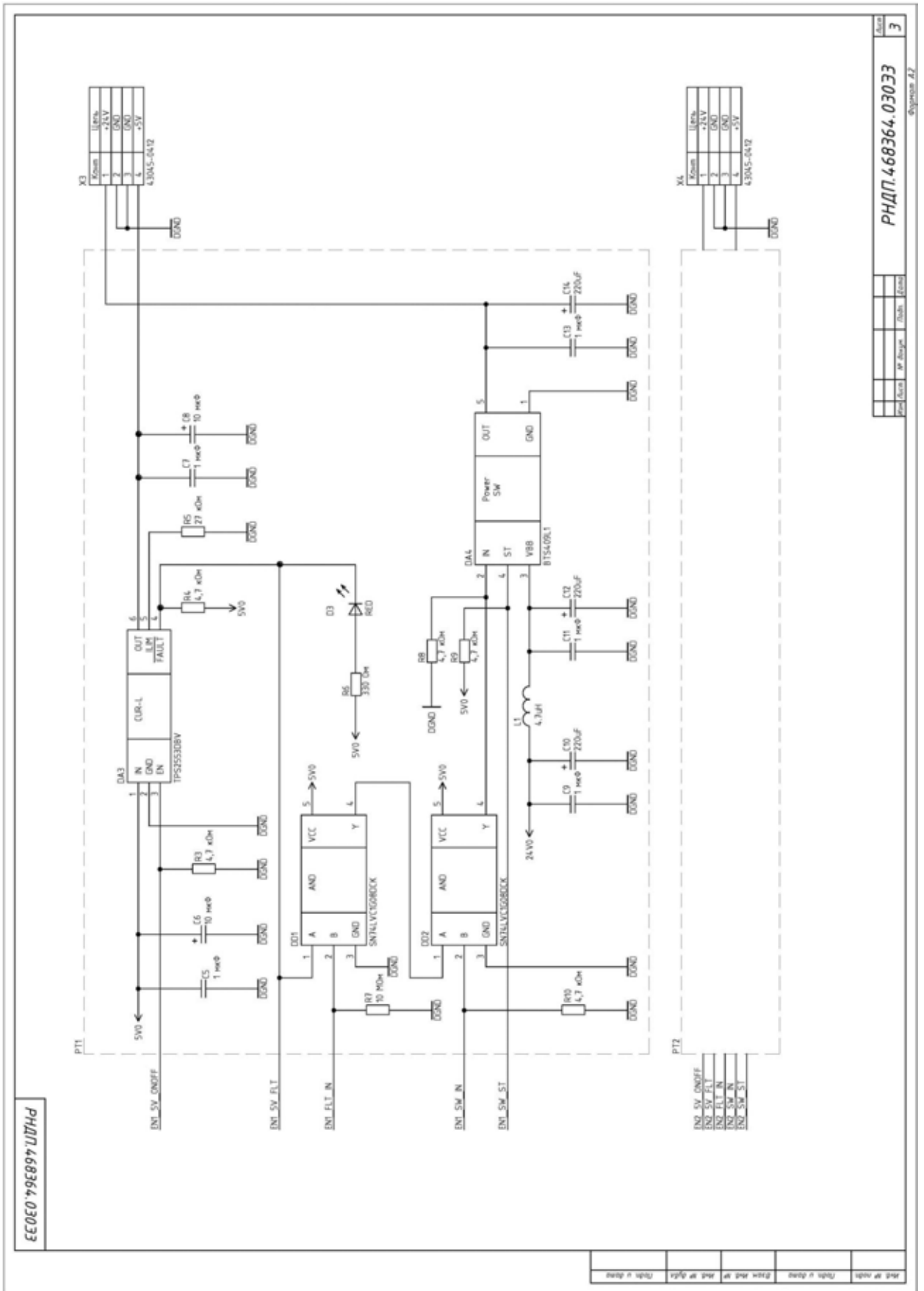


Рисунок 122 – Схема электрическая принципиальная блока питания

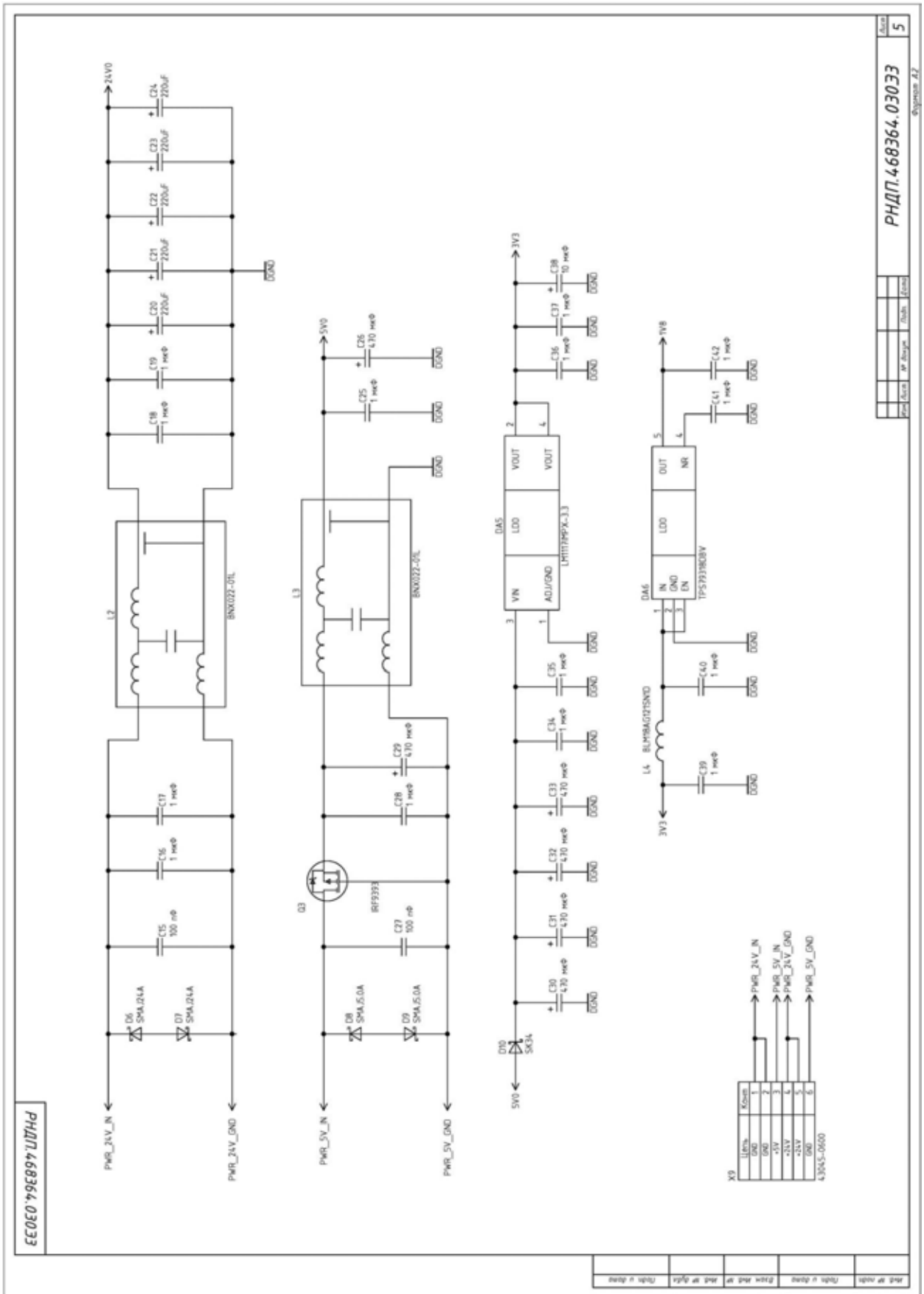


Рисунок 123 – Схема электрическая принципиальная блока питания

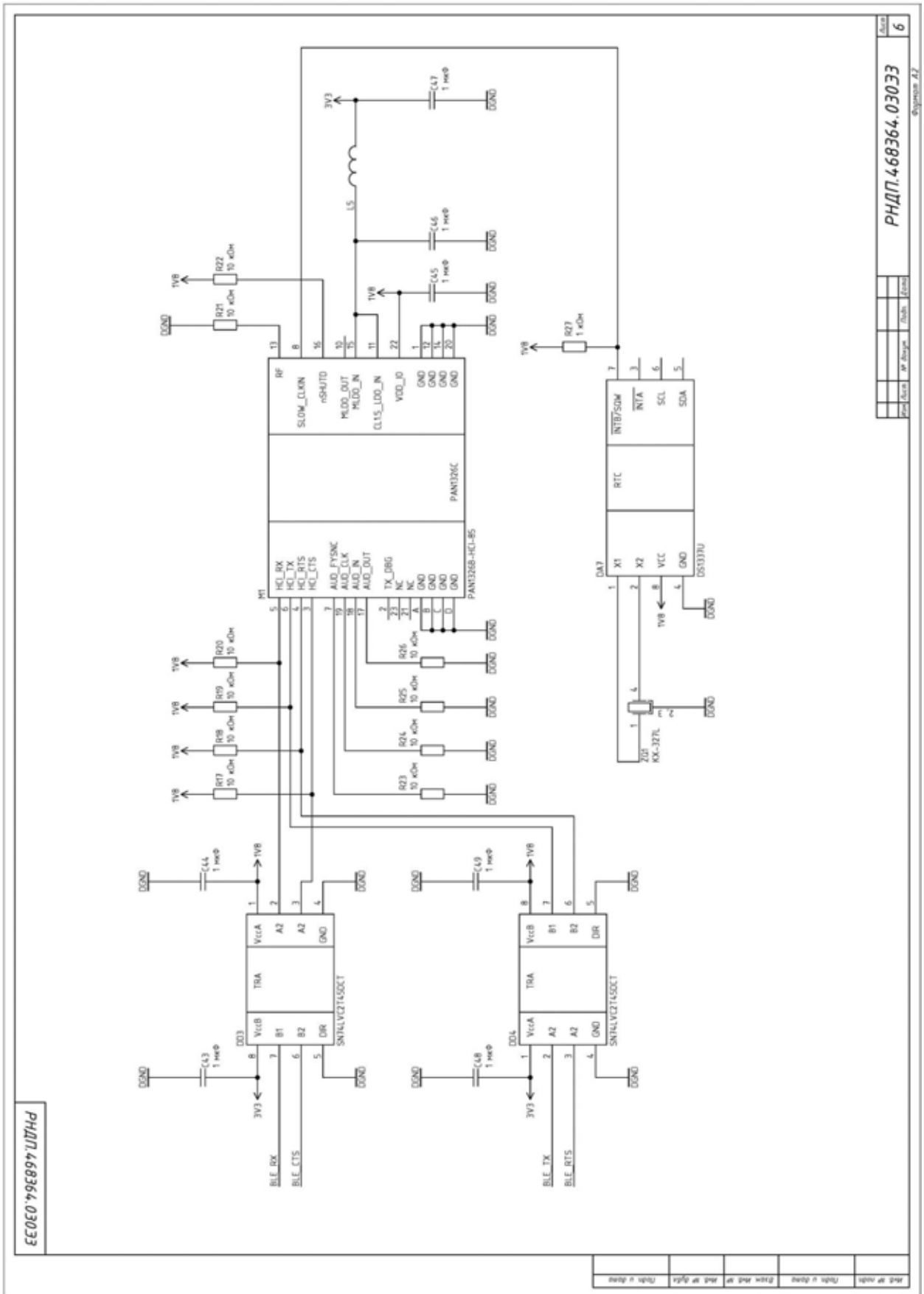


Рисунок 124 – Схема электрическая принципиальная интерфейсной части блока сопряжения

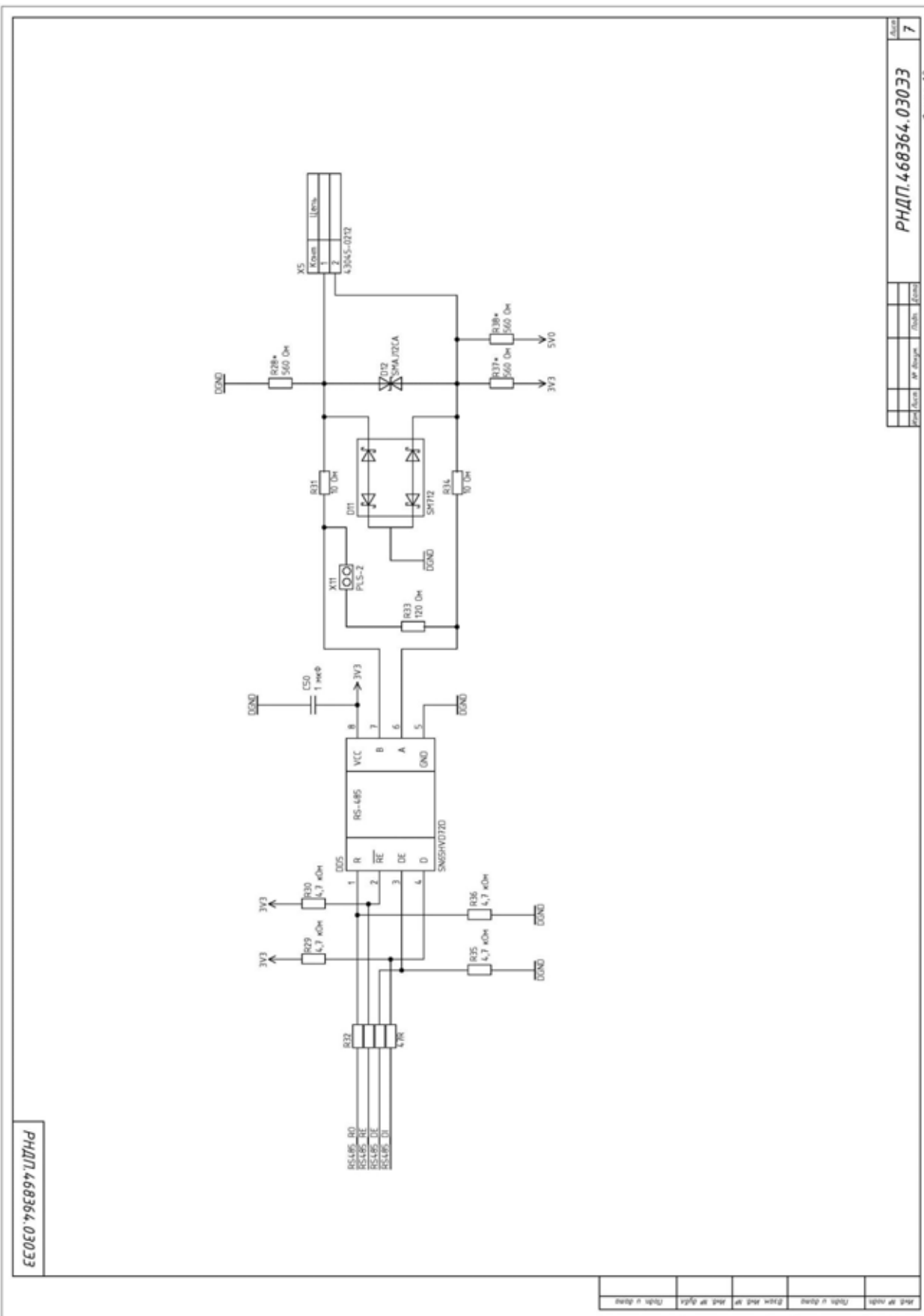


Рисунок 125 – Схема электрическая принципиальная интерфейсной части блока сопряжения

## 12.2 Электронная схема управления измерительным модулем.

Конструкция портативного твердомера подразумевает наличие двух измерительных датчиков – датчика силы и датчика перемещения. Для оптимизации конструкции оба эти датчика принято решение делать дифференциальными с аналогичными трактами обработки сигналов, с различными коэффициентами усиления и полосами пропускания. Датчики такого типа имеют малый вес, низкое потребление электроэнергии, высокую чувствительность и большой ресурс работы. Самый главный недостаток – высокая чувствительность к помехам. Корпус прибора, выполненный из проводящего материала, будет являться помехозащитным экраном. Так же в рамках борьбы с паразитными электромагнитными явлениями была выбрана частота зондирующих колебаний 300 кГц, что гораздо выше распространенных промышленных помех.

Возможны два режима работы аналоговой части схемы: с обратной связью и без неё. Переключение режима осуществляется путём воздействия на герконовые реле IM06GR, производства TE Connectivity (Тусо), Швейцария. Принципиальная электрическая схема детектора отображена на рисунке 126.

Было разработано два варианта генератора зондирующих колебаний. Схема первого, аналогового, изображена на рисунке 126. Результаты компьютерного моделирования показали, что данная схема не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к температурной стабильности амплитуды. Было принято решение о разработке цифровой схемы. Цифровой генератор синусоидальных колебаний повышенной стабильности схема базируется на микроконтроллере STM32F410CBT3 (STMicroelectronics, Швейцария). Параметры цифрового генератора не изменяются в зависимости от температуры, что делает его амплитуду более стабильной, чем у аналогового. Программа была написана таким образом, чтобы после «прошивки» контроллера оставалась возможность настройки его параметров – вида

сигнала, частоты и амплитуды. При первом включении цифрового генератора необходимо программно включить генерацию и при необходимости изменить выставленные по умолчанию синусоидальные колебания с частотой 300КГц и размахом 5В.

После установления типа сигнала и его амплитуды, в память прописывается сетка значений, которые после включения генерации последовательно передаются цифро-аналоговому преобразователю. Механизм выборки значений реализован при помощи контроллера DMA – прямого доступа в память. Это позволяет избавиться от временных задержек, которые возникли бы при постоянном вычислении текущих значений. Шестнадцатитбитный цифро-аналоговый преобразователь DAC8820 (Texas Instruments, США) имеет уровень шума  $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , что при полосе сигнала 300КГц составляет 5мкВ. Таким образом, достигается точность 0,5%. Так же достоинствам ЦАП можно отнести высокую частоту дискретизации 8МГц. Всё это позволило получить цифровой генератор зондирующих колебаний, удовлетворяющий предъявляемым требованиям по стабильности амплитуды зондирующих колебаний. Стабильность частоты в настоящем устройстве не имеет особого значения. Однако, использование кварцевого задающего генератора гарантирует высокую долговременную стабильность рабочей частоты схемы съема информации.



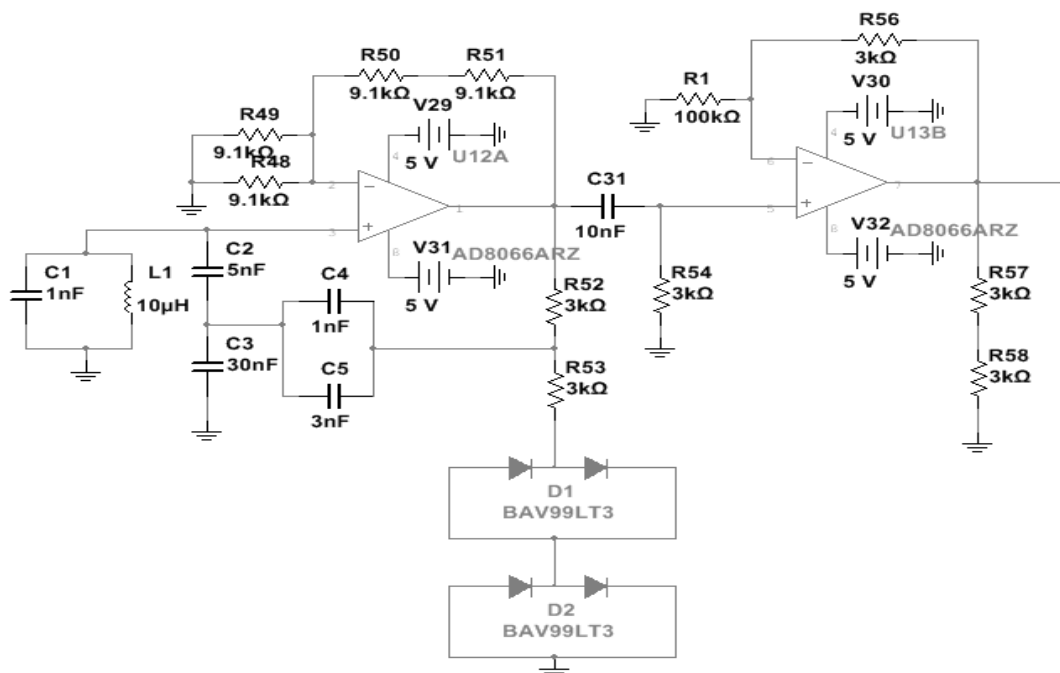


Рисунок 126 – Схема аналогового генератора синусоидального сигнала.

Режим работы аналогового тракта без обратной связи можно описать следующим образом. Синусоидальный сигнал, получаемый с выхода цифрового генератора, подается параллельным образом на инвертирующий и не инвертирующий усилители. Парафазный сигнал поступает на трансформатор, где увеличивается его амплитуда. Далее по кабельным сборкам 5.1 и 5.2 сигнал поступает на дифференциальный конденсатор, на выходе которого и возникает сигнал, зависящий от положения средней обкладки. Максимально физически близко к емкостному датчику, обычно в корпусе прибора, установлен предварительный усилитель. Он нужен для увеличения амплитуды сигнала, поступающего с емкостного датчика и создания из одного синусоидального сигнала двух парафазных, чтобы снизить влияние помех на передаваемый по медно-кабельной линии связи сигнал. Вернувшись на основную плату, сигнал поступает в усилитель, после которого аналоговым способом умножается на синусоидальный сигнал. В результате перемножения получается постоянное напряжение, размер которого зависит от показаний емкостного датчика. Постоянное напряжение фильтруется, усиливается и регистрируется при помощи АЦП.

При наличии обратной связи аналоговый тракт работает подобным образом, только на трансформатор подается часть входного сигнала, проинтегрированная, умноженная на сигнал автогенератора и усиленная. Режим работы схемы с обратной связью предусмотрен для компенсации нелинейности, возникающей в емкостном датчике при больших перемещениях.

В таблице 2 приведены ёмкости конденсаторов и смещения, а так же выходные напряжения, полученные с помощью моделирования системы.

Таблица 2. Характеристики емкостного датчика

d <sub>1</sub> , мм	d <sub>2</sub> , мм	D, мм	C <sub>1</sub> , пФ	C <sub>2</sub> , пФ	ΔC, пФ	U <sub>1</sub> , мV Без ОС	U <sub>2</sub> , мV Без ОС	U <sub>1</sub> , мV с ОС	U <sub>2</sub> , мV с ОС	U <sub>3</sub> , μV с ОС
0,5	0,5	0	100	100	0	-	-	-	-	-
0,4878	0.5132	0,0127	102.5	97.43	5.07	53.2	16	57.5	165	699
0,4762	0,5238	0,0238	105	95.46	9.54	91.7	274	96	278	882
0,4651	0,5349	0,0349	107.5	93.48	14.02	130	391	134	390	1060
0,4545	0,5455	0,0455	110	91.66	18.34	167	494	172	501	1240
0,4444	0,5556	0,056	112.5	89.99	22.51	203	599	207	610	1410
0,4348	0,5652	0,0652	115	88.46	26.54	238	714	242	720	1580
0,4255	0,5745	0,0745	117.5	87.03	30.47	272	802	275	818	1735
0,4167	0,5833	0,0833	120	85.72	34.28	305	900	309	916	1890
0,4082	0,5918	0,0918	122.5	84.49	38.01	336	997	341	1010	2050
0,4	0,6	0,1	125	83.33	41.67	358	1070	370	1098	2180
0.3846	0.6154	0.1154	130	81.248	48.752	381	1140	442	1280	2391
0.3704	0.6296	0.1296	135	79.415	55.58	397	1180	506	1428	2617
0.3333	0.6667	0.1667	150	74.996	75.004	414	1220	570	1724	2843

На рисунках 127, 128, 129, 130 отражены смоделированные зависимости выходных напряжений от изменения ёмкости конденсатора и, для наглядности, от смещения индентора соответственно для схем с обратной связью и без неё. При больших значениях эти зависимости носят нелинейный характер, что объясняется нелинейностью зависимости изменения ёмкости от смещения. Это свидетельствует о необходимости использования при

больших перемещениях в емкостном датчике схемы аналоговой регистрации с обратной связью, которая необходима для компенсации нелинейности. Результаты моделирования системы позволили ввести обратную связь корректным образом и оценить ее работу.

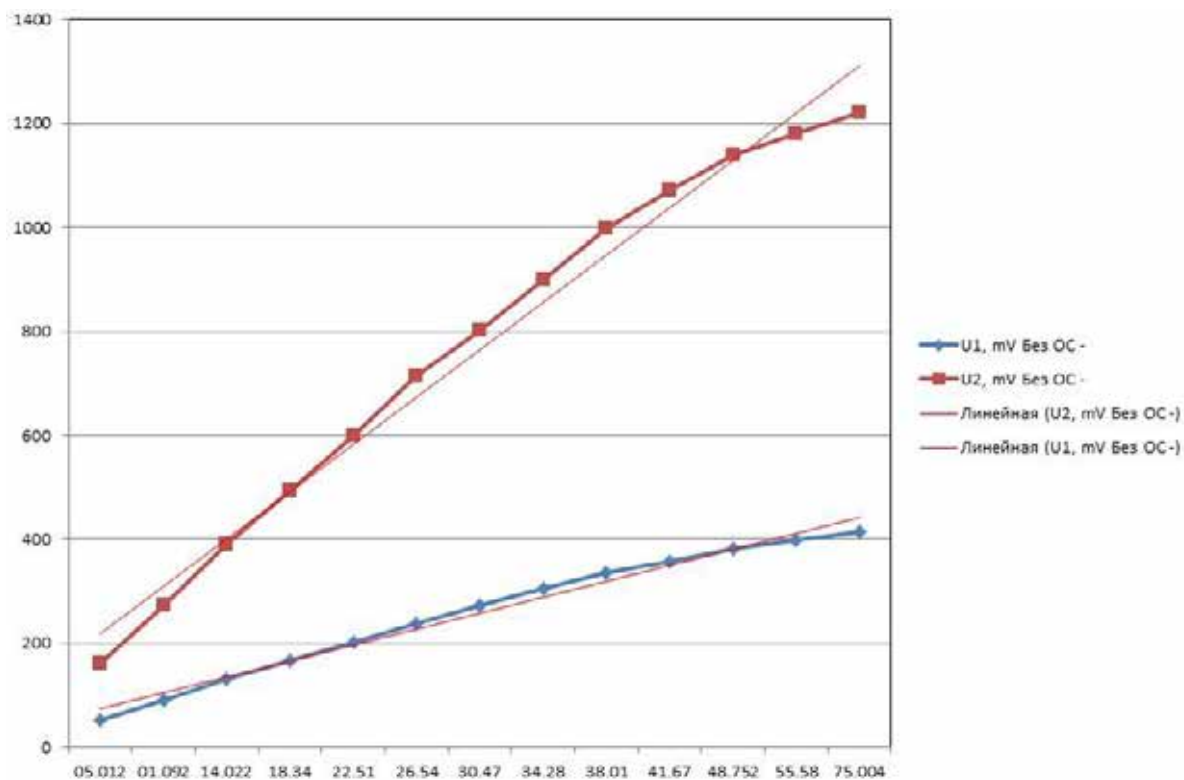


Рисунок 127 – Зависимости выходных напряжений от изменения ёмкости в схеме без обратной связи

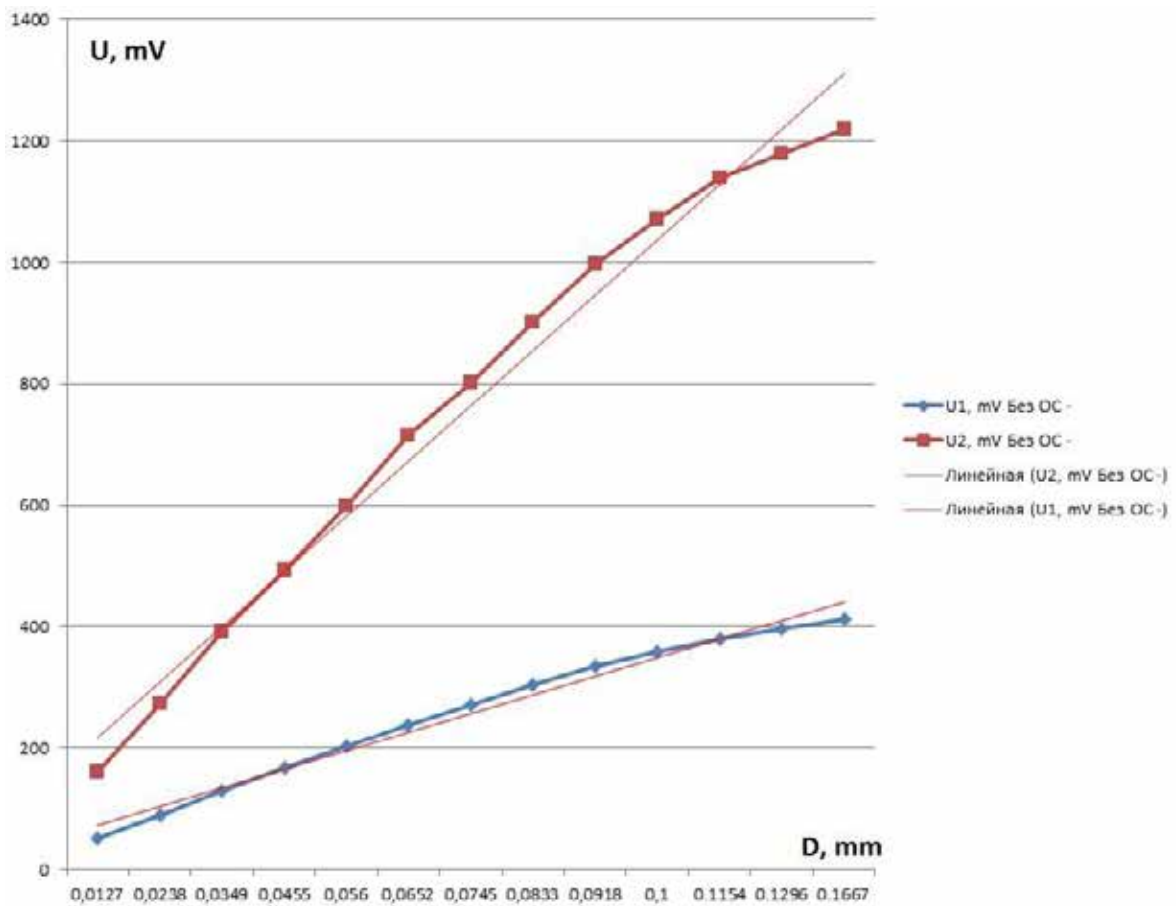


Рисунок 128 – Зависимости выходных напряжений от смещения индентора в схеме без обратной связи

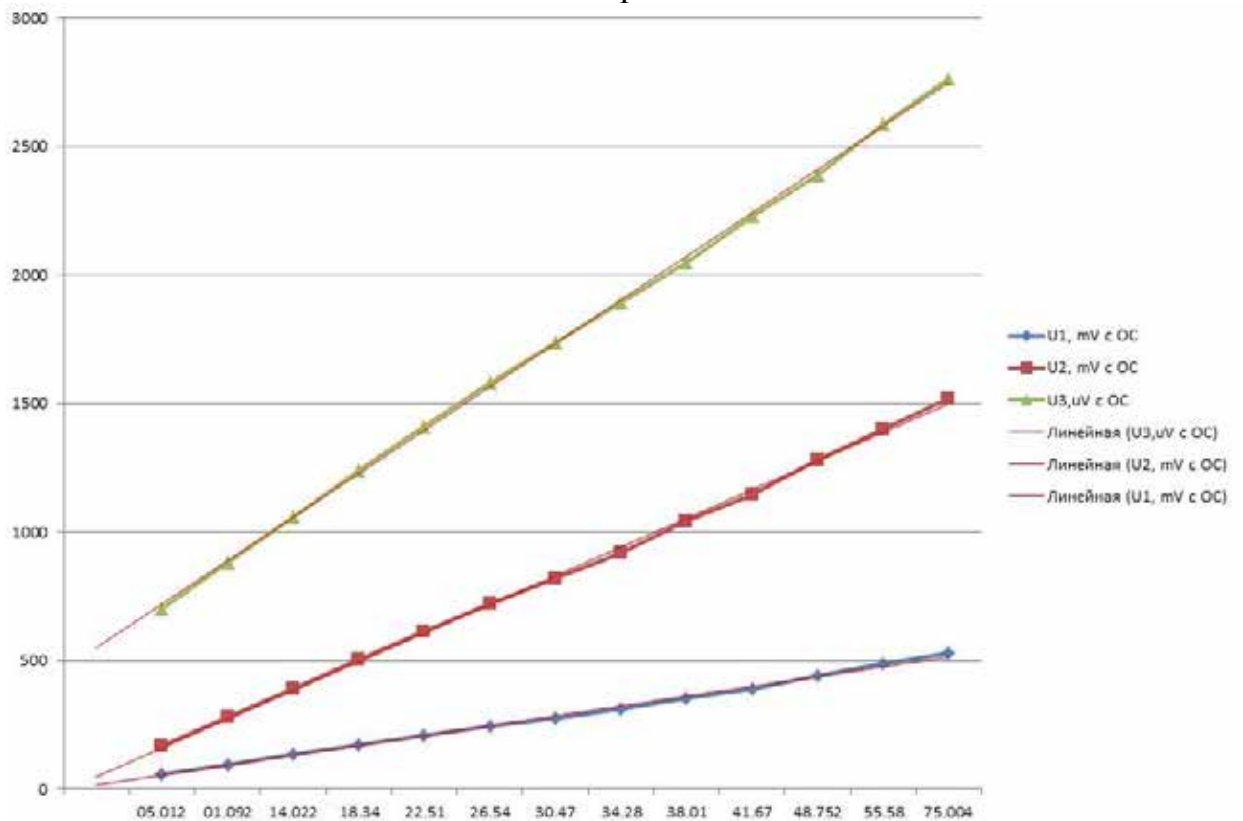


Рисунок 129 – Зависимости выходных напряжений выходов от ёмкости в схеме с ОС

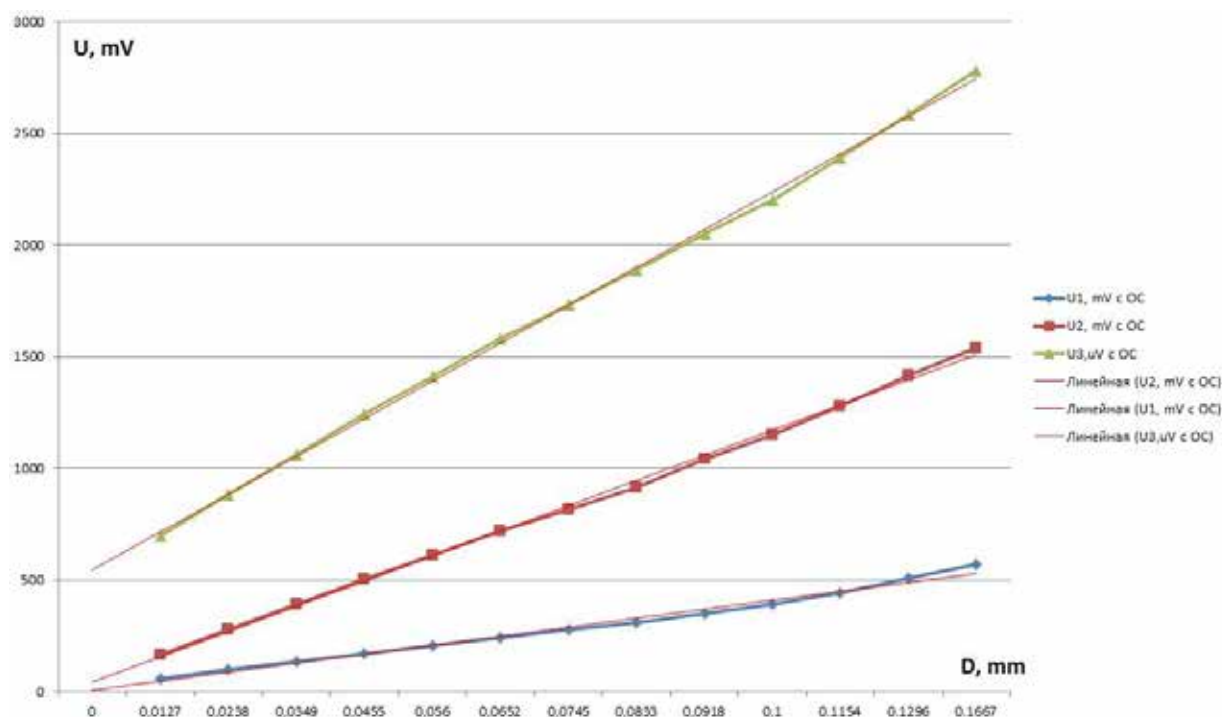


Рисунок 130 – Зависимости выходных напряжений выходов от смещения индентора в схеме с ОС

Важной частью схемы регистрации смещения является предварительный усилитель, выполненный в виде отдельной платы, и установленный непосредственно в индентирующей головке. Он принимает синусоидальный сигнал от дифференциального конденсатора, для уменьшения влияния помех усиливает его и отправляет по кабелю до основной схемы парафазный сигнал. Его схема изображена на рисунке 131, а амплитудно-частотная характеристика, полученная с помощью моделирования, представлена на рисунке 132.

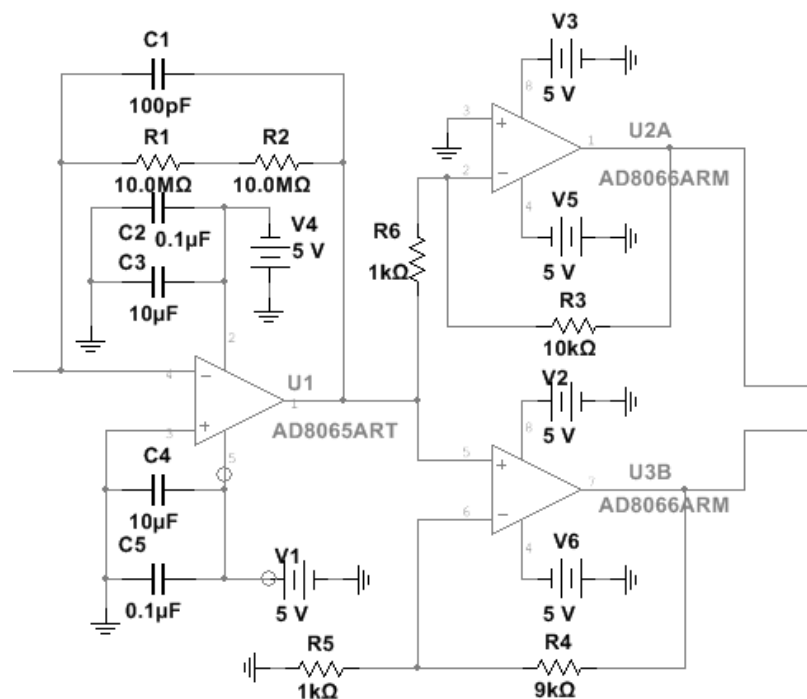


Рисунок 131 – Схема предварительного усилителя

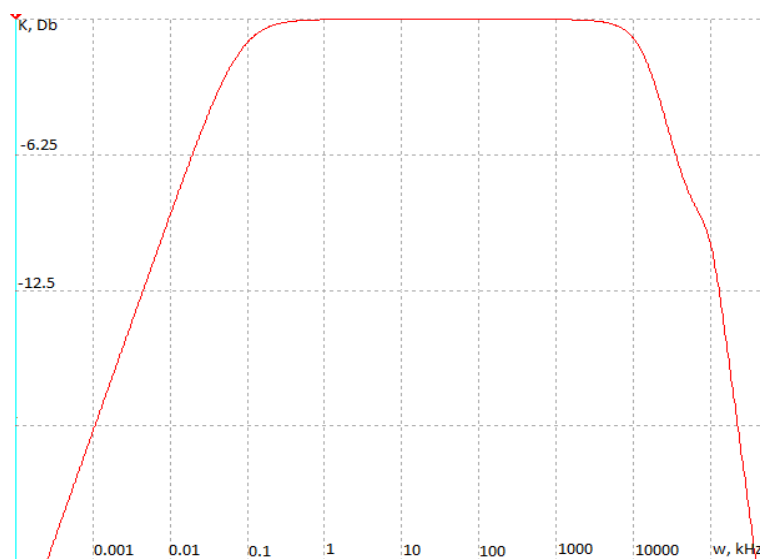


Рисунок 132 – Амплитудно-частотная характеристика предварительного усилителя

Далее приведены сборочный чертеж и принципиальная электрическая схема блока детектирования.

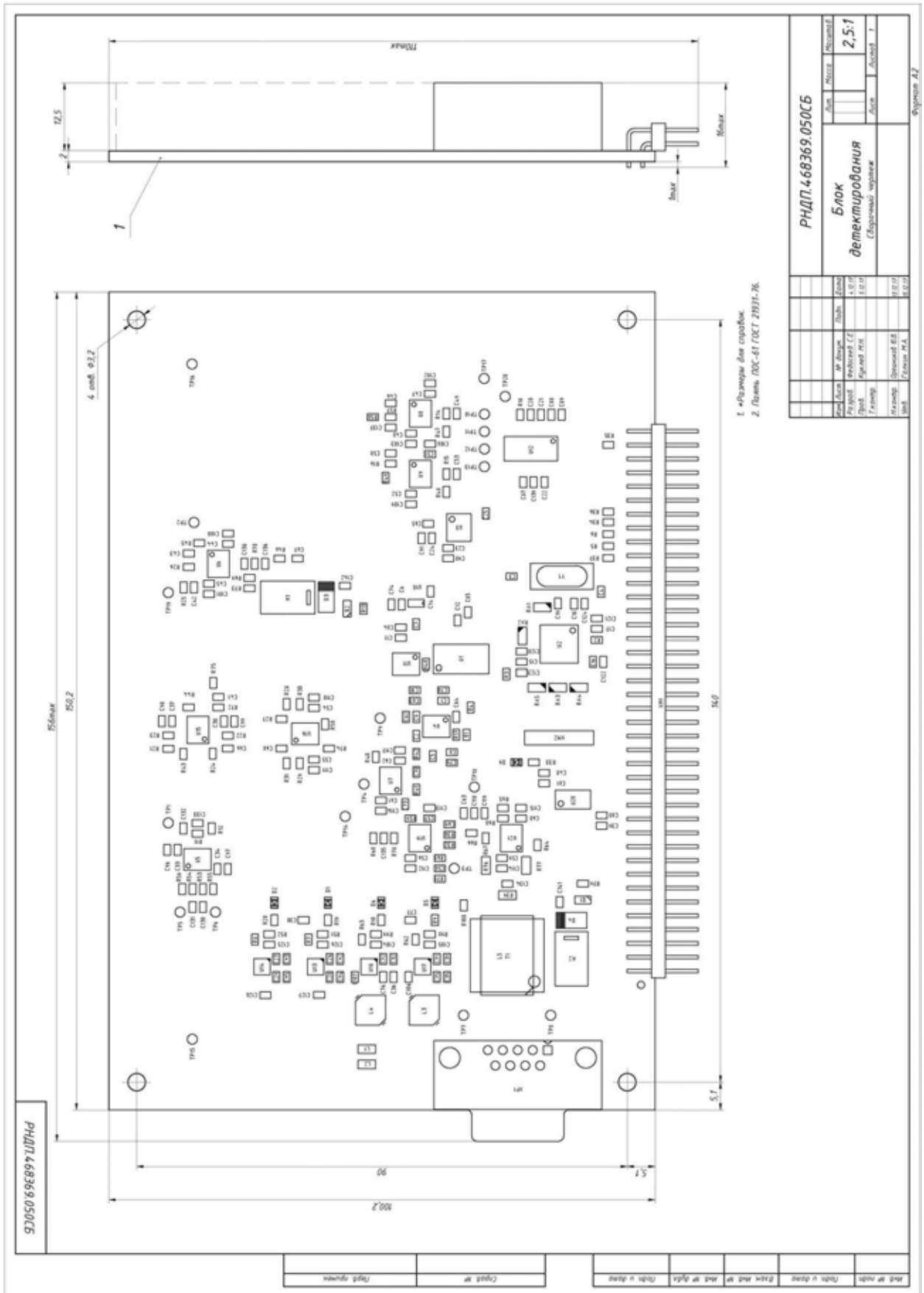
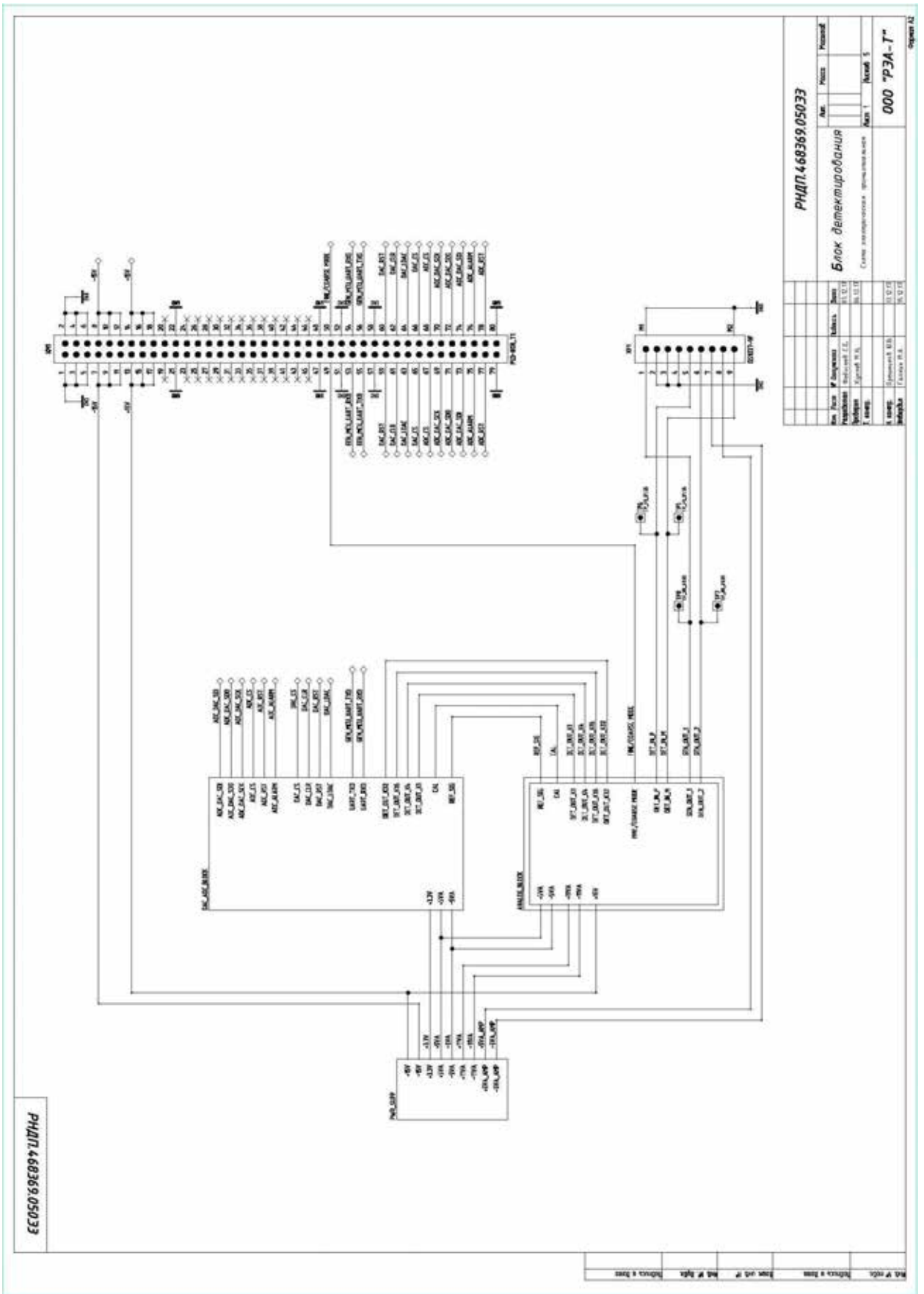


Рисунок 133 – Сборочный чертеж блока детектирования



РДП 4.68369.05033

РДП 4.68369.05033

Блок детектирования

Имя	Лист	Кол-во	Материал	Дата
Рудневский Е.Е.	1	1	Б.1.1.1	10.12.14
Город	Уровень	№ п/п	№ п/п	№ п/п
Т. номер	Листов	5	000	РДП-Г
И. номер	Город	№ п/п	№ п/п	№ п/п
Итого	Итого	№ п/п	№ п/п	№ п/п

Рисунок 134 – Схема электрическая принципиальная блока электроники



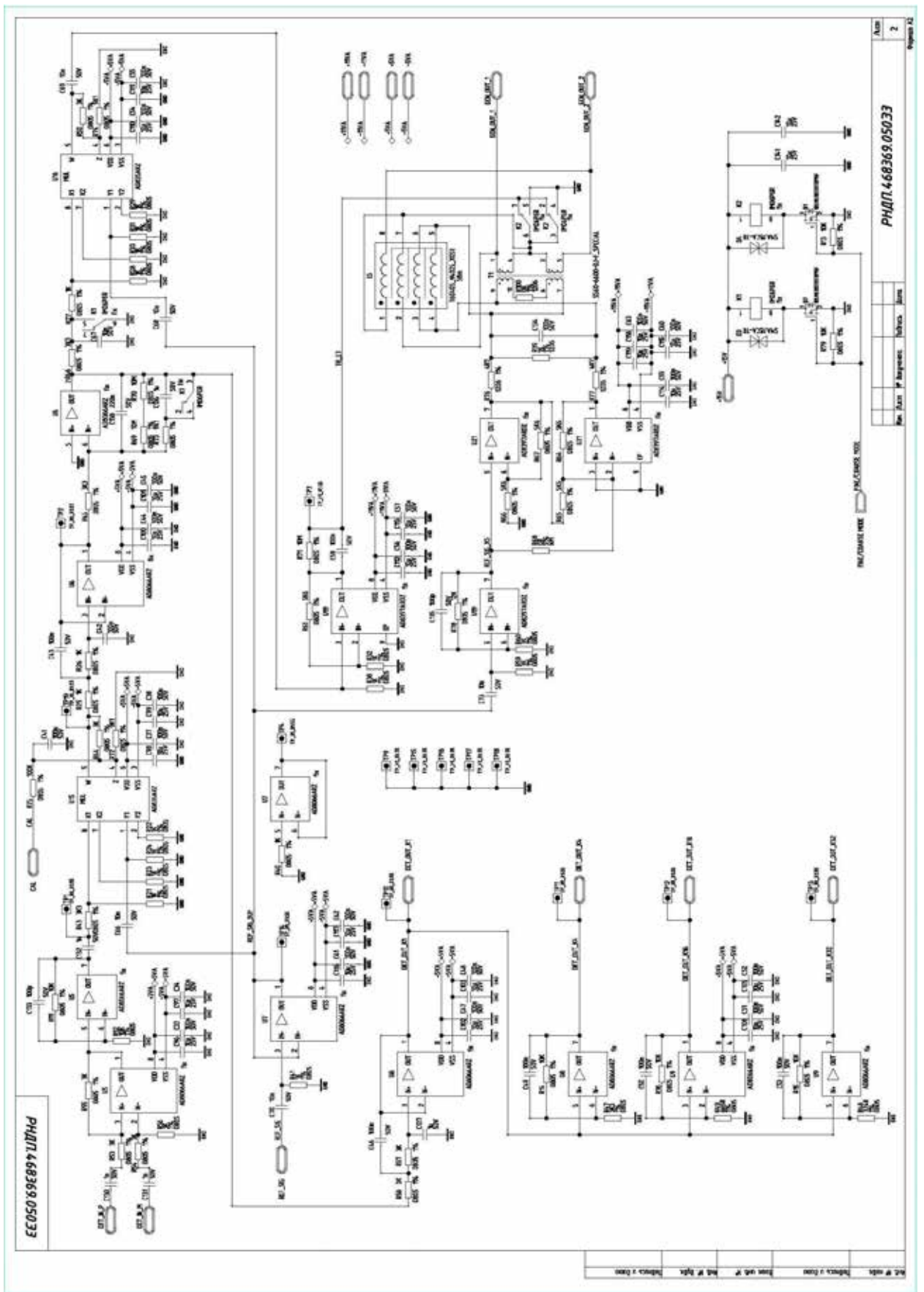


Рисунок 135 – Схема электрическая принципиальная блока электроники

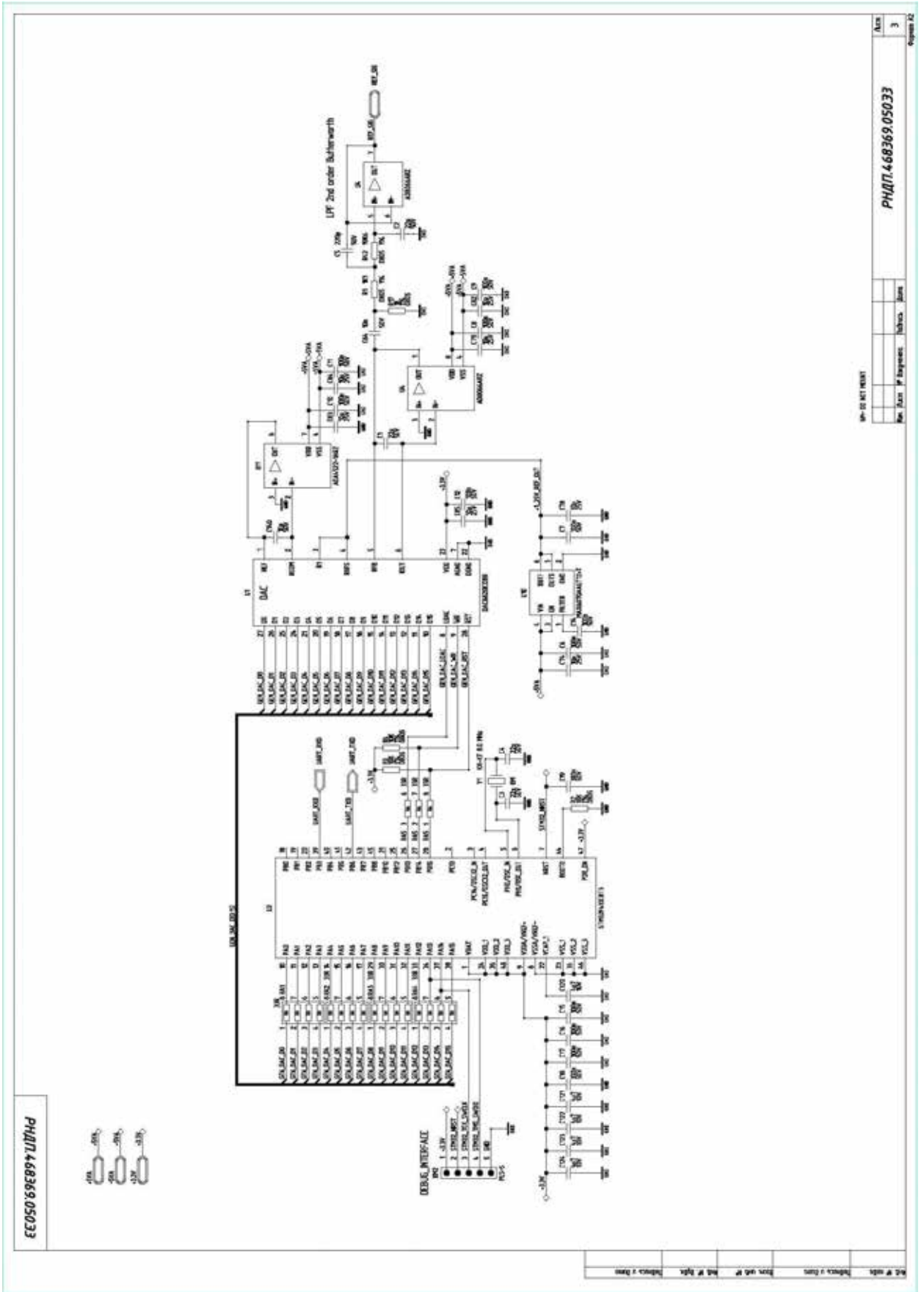
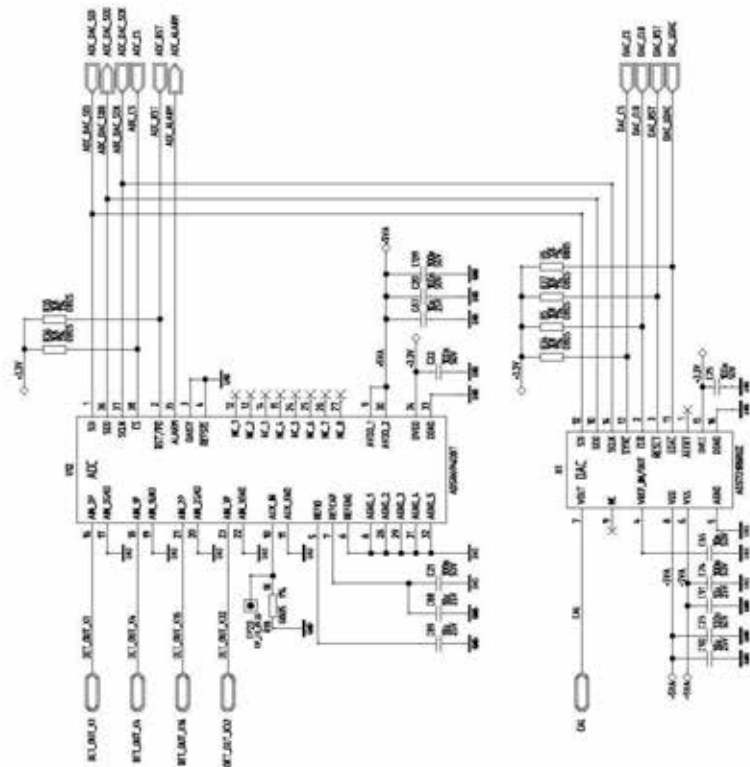


Рисунок 136 – Схема электрическая принципиальная блока электроники

PHП.4.68369.05033



PH-20-1011-1001

PHП.4.68369.05033

№ Изм. P Испытания Изучка Дата

Лист 4  
Кол-во 22

Рисунок 137 – Схема электрическая принципиальная блока электроники

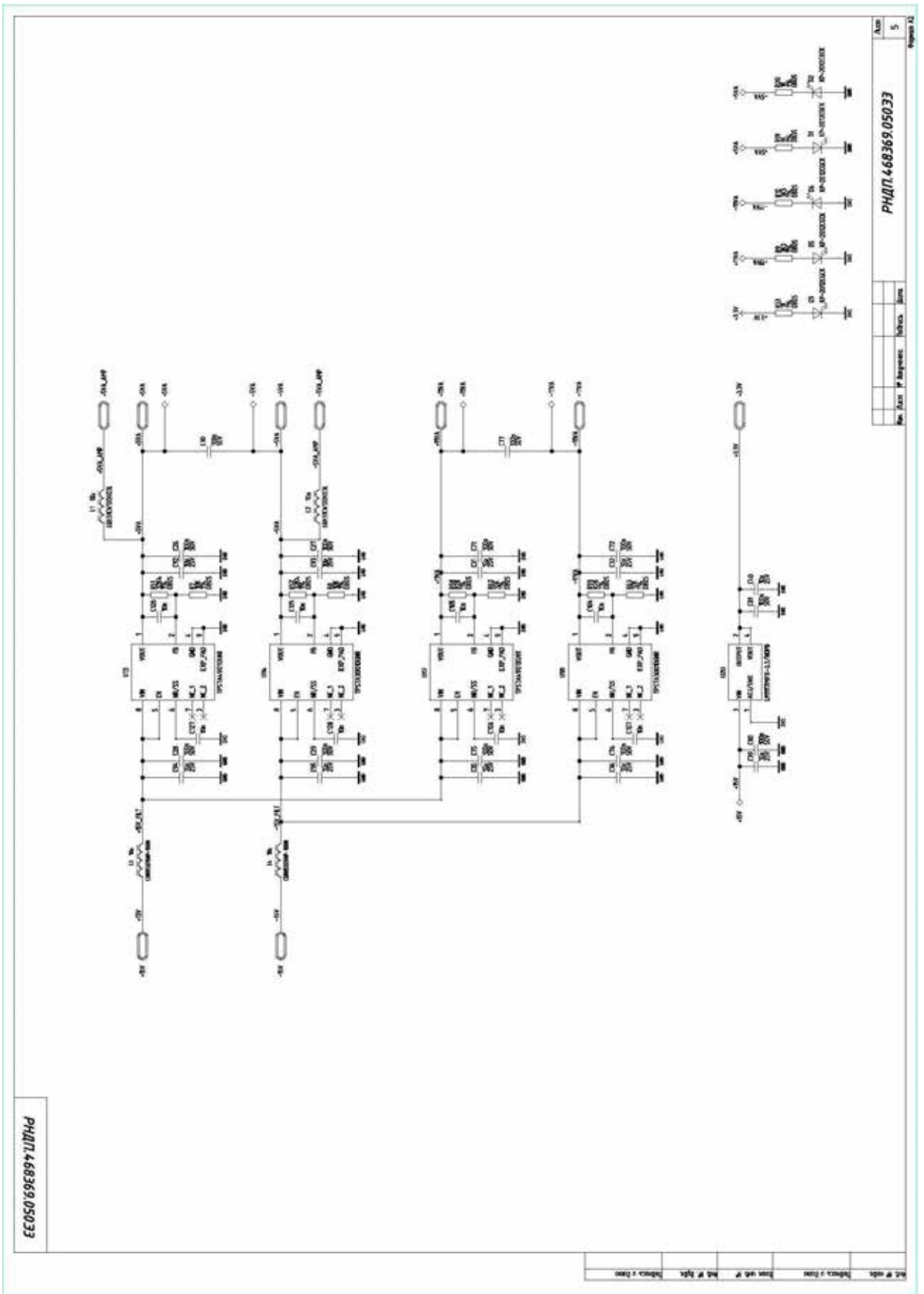


Рисунок 138 – Схема электрическая принципиальная блока электроники

### 12.3 Вычислительный блок.

В качестве основного вычислительного элемента в портативном твердомере было принято решение использовать микроконтроллер LPC4357FET256, производства фирмы NXP, Нидерланды. Это современный двухъядерный микроконтроллер, базирующийся на процессоре Cortex-M4, имеющем архитектуру ARM. Микроконтроллер имеет разрядность тридцать два бита, что позволяет корректно работать с периферийными устройствами (в частности с АЦП), имеющими высокую разрядность. В настоящем приборе планируется осуществлять съем данных с нескольких высокоскоростных датчиков, первичную обработку в микроконтроллере и отправку по интерфейсу USB или беспроводному интерфейсу в ПК. Результаты расчетов и моделирования работы микроконтроллера подтверждают, что частота тактирования 204 МГц и возможность использования функции прямого доступа в память позволяют реализовать обработку и передачу данных с помощью выбранного устройства. Для буферизации полученной с датчиков информации принято решение использовать внешнюю синхронную динамическую память с произвольным доступом MT48LC16M16A2P-6A, производства фирмы Micron, США. Большое количество выводов микроконтроллера позволяет, в случае необходимости подключения дополнительных узлов или датчиков, без кардинальных изменений в конструкции и элементной базе легко масштабировать систему.

Выбранная среда разработки поддерживает возможность эмулирования работы микроконтроллерных систем. В рамках проекта была сконфигурирована модель, базирующаяся на выбранном микроконтроллере, и на языке ассемблера составлена небольшая тестовая программа, позволяющая реализовать основные функции системы. На рисунке 139 показано ее начальное состояние

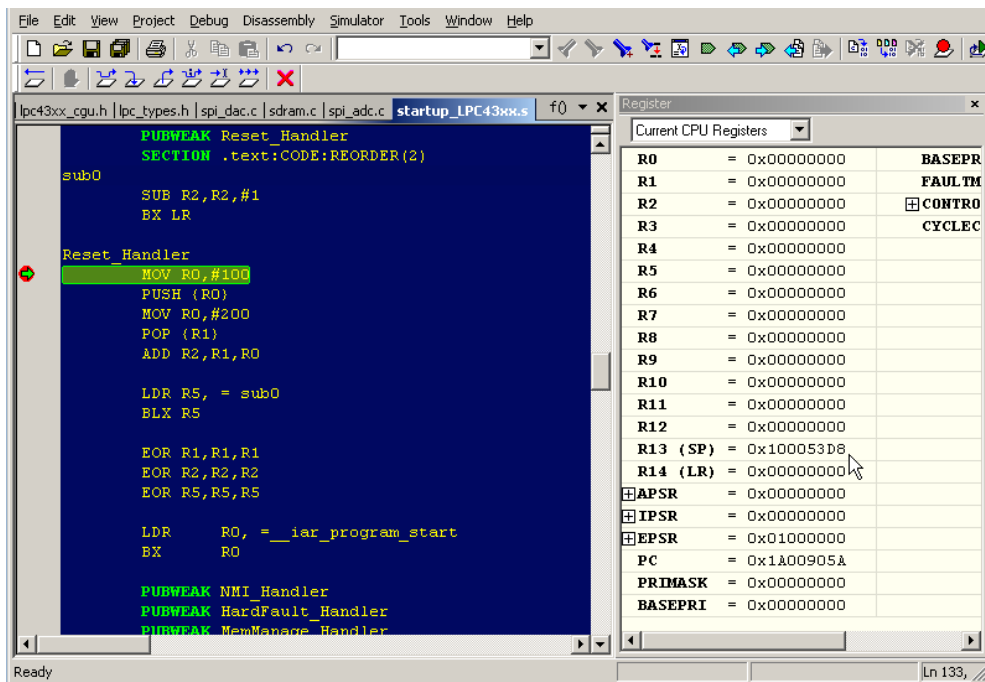


Рисунок 139 – Начальное состояние модели микроконтроллерной системы

Первые команды должны записать в регистр памяти R0 значение 100, затем сохранить это значение в стек памяти, перезаписать регистр R0 и извлечь значение стека памяти в регистр R1. На рисунке 140 видно, что функции записи и перезаписи в регистры работают корректно. Так же нормально осуществляется работа со стеком памяти и адресация, так как на рисунке 141 видно, что адрес стека изменяется.

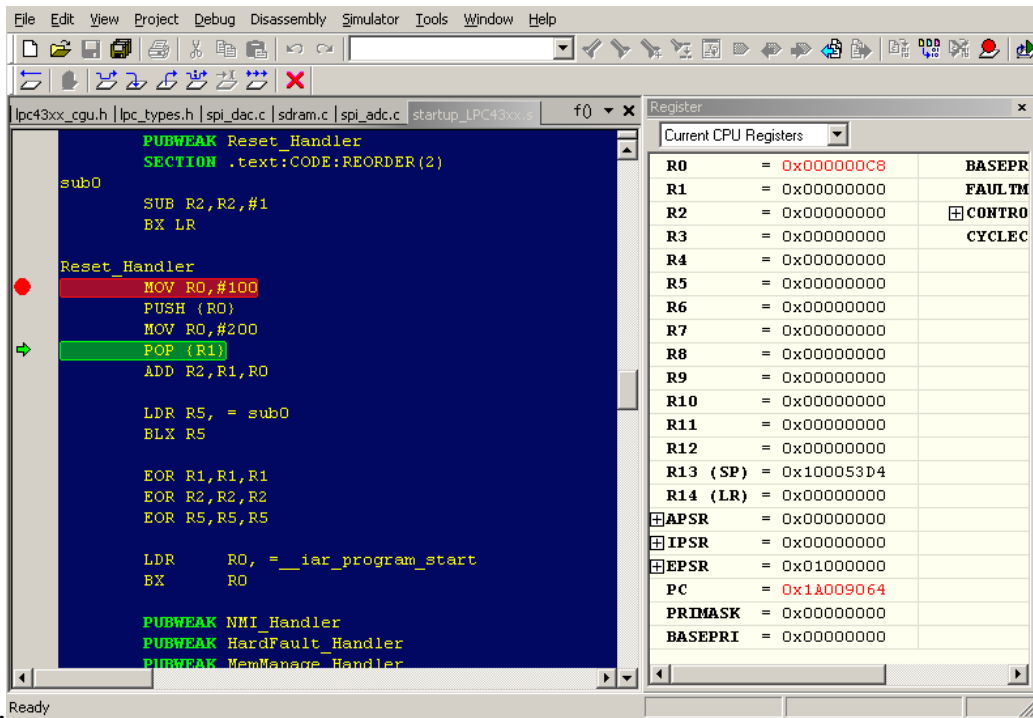


Рисунок 140 – Моделирование функций записи и перезаписи

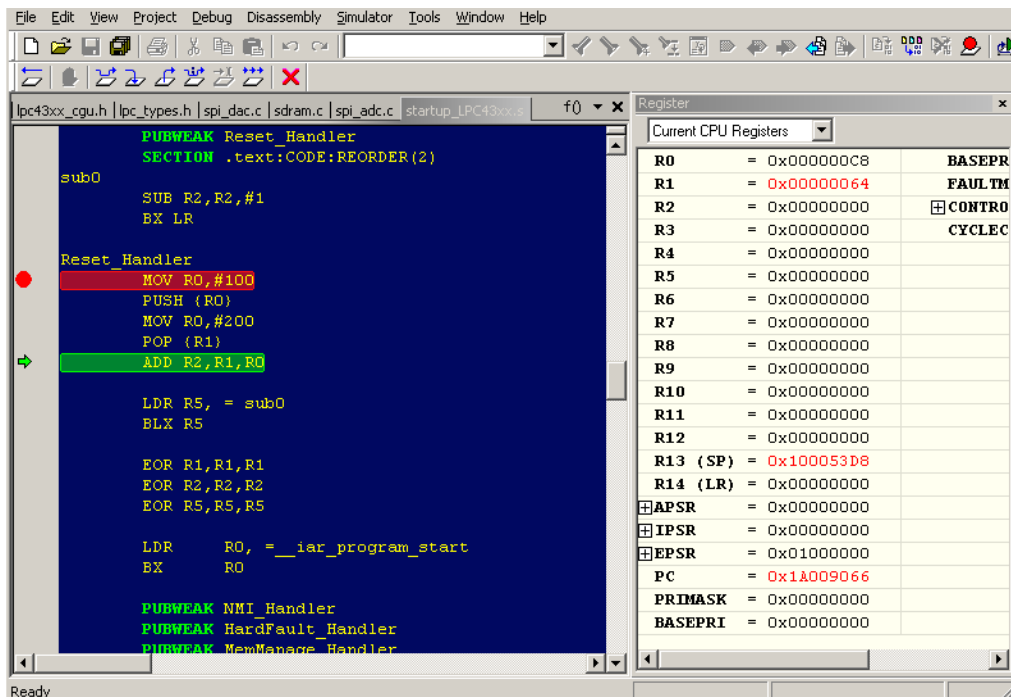


Рисунок 141 – Моделирование работы с адресацией и со стеком памяти

Следующим шагом была проверена работоспособности вычислительных функций микроконтроллера, на примере операции сложения. Сложены числа 100 и 200, результат записан в регистр памяти R2 (рисунок 142).

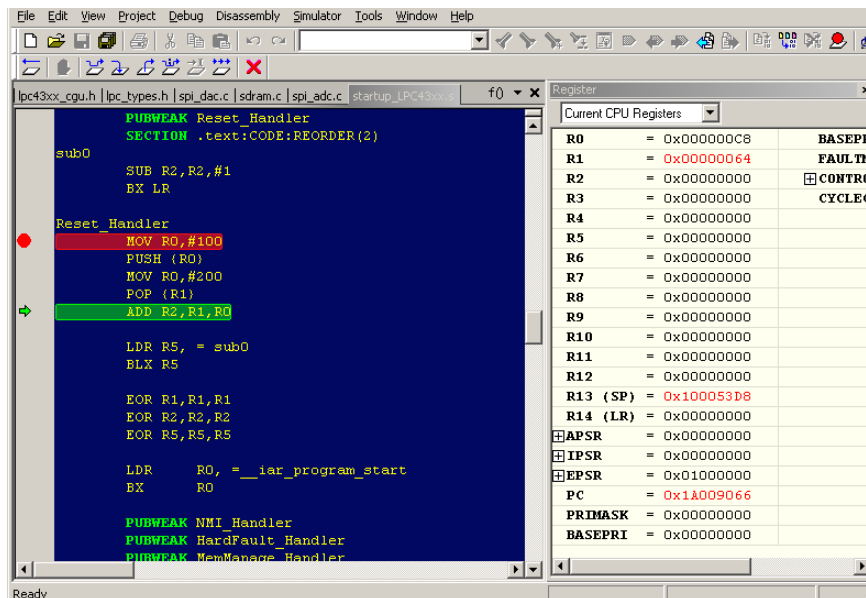


Рисунок 142 – Моделирование работы вычислительных функций

Далее была проверена возможность работа с подпрограммами. Это важный инструмент программирования микроконтроллеров, так как позволяет оптимизировать программу по объёму занимаемой памяти. Процесс работы с подпрограммой заключается в переходе в подпрограмму, выполнения ее алгоритма и возврате в основную программу на команду, следующую после команды перехода или в другое место, обозначенное специальной меткой. В тестовой программе подпрограмма называется sub0. Прежде чем осуществить переход, адрес перехода записывается в регистр R5 (рисунок 143).



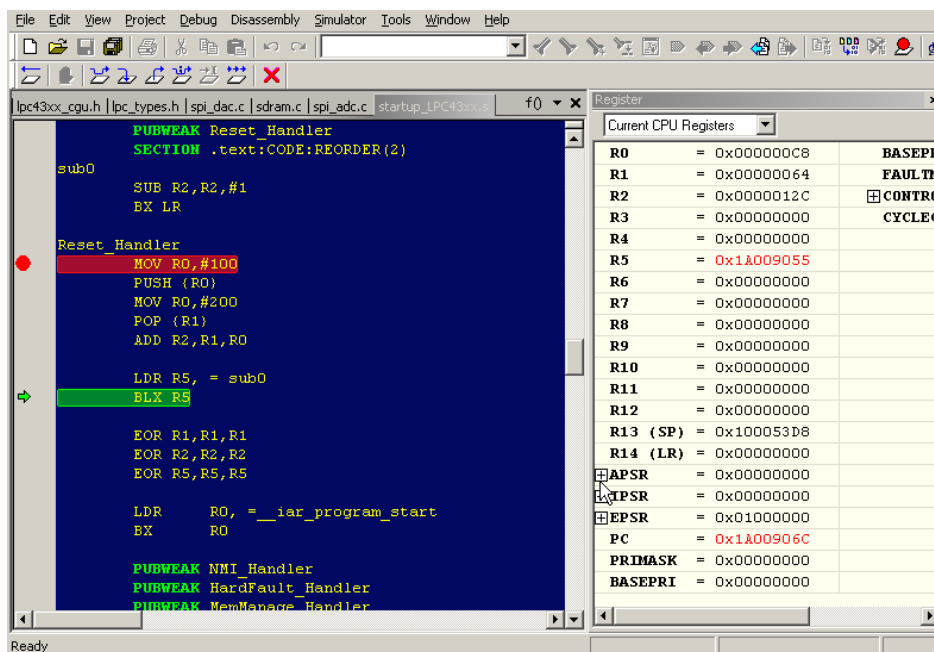


Рисунок 143 – Переход в подпрограмму

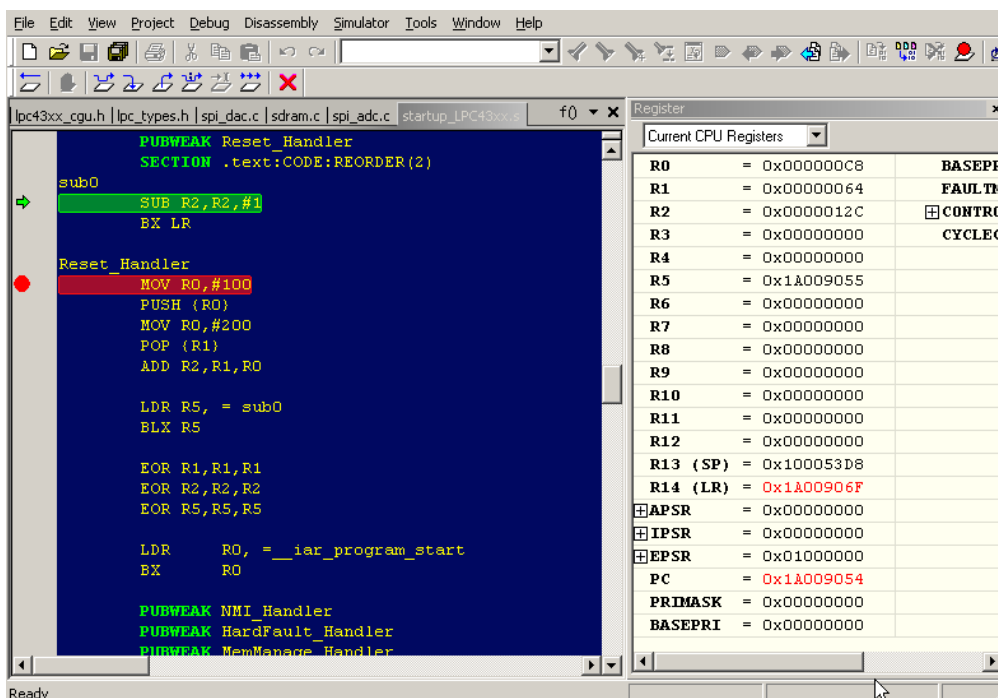


Рисунок 144 – Выполнение алгоритма подпрограммы

После выполнения алгоритма подпрограммы необходимо осуществить возврат из подпрограммы на команду, следующую за командой перехода BLX R5. Регистр R14, также называемый «регистром связи» (LR) содержит в себе число 0x1A00906F. Это адрес возврата. После выполнения должен быть произведён переход к команде EOR R1, R1, R1, а содержимое PC (программного счётчика) должно начать показывать число на единицу

меньшее, чем LR (что связано с технологическими особенностями работы микроконтроллера), рисунок 144 и 145.

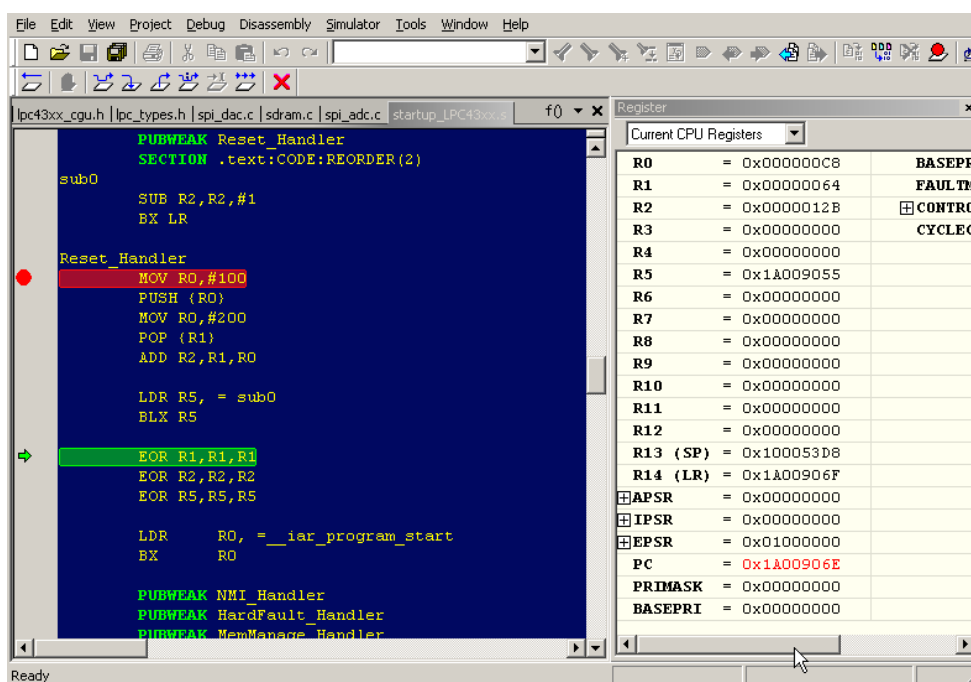


Рисунок 145 – Выход из подпрограммы

## 12.4 Аналогово-цифровой преобразователь.

Напряжение, получаемое с аналогового тракта емкостного датчика, прямо пропорционально перемещению индентора. Для преобразования в двоичный код было решено использовать аналого-цифровой преобразователь ADS8694, производства фирмы Texas Instruments, США. Это современный восемнадцати битный АЦП с частотой дискретизации пятьсот тысяч выборок в секунду. Выбранный преобразователь имеет 4 канала. При наличии входных усилителей с различными коэффициентами усиления, выбранная схема оцифровки сигнала удовлетворяет требованиям и по точности и по диапазону. В рамках проекта было проведено моделирование взаимодействия микроконтроллера с аналого-цифровым преобразователем. Для этого была написана библиотека функций, с помощью которой можно осуществлять прием данных из АЦП, используя стандартизованные команды высокого языка программирования. Для проверки модель АЦП выдавала значения всех

каналов по очереди. В соответствии с документацией структура пакета должна будет быть следующей:

Таблица 3. Структура пакета данных

Номера битов	15 (старший)-9	8	7-0
Назначение битов	Номер регистра АЦП	0, если читаем, 1 если пишем.	данные, которые надо записать в АЦП

В нашем случае номер регистра должен быть равен 1. Бит чтения/записи должен быть равен 1, а данные должны быть равны 0xF, что соответствует выбору всех четырёх каналов. На рисунке 146 видно, что в модели формирование пакета происходит корректно.

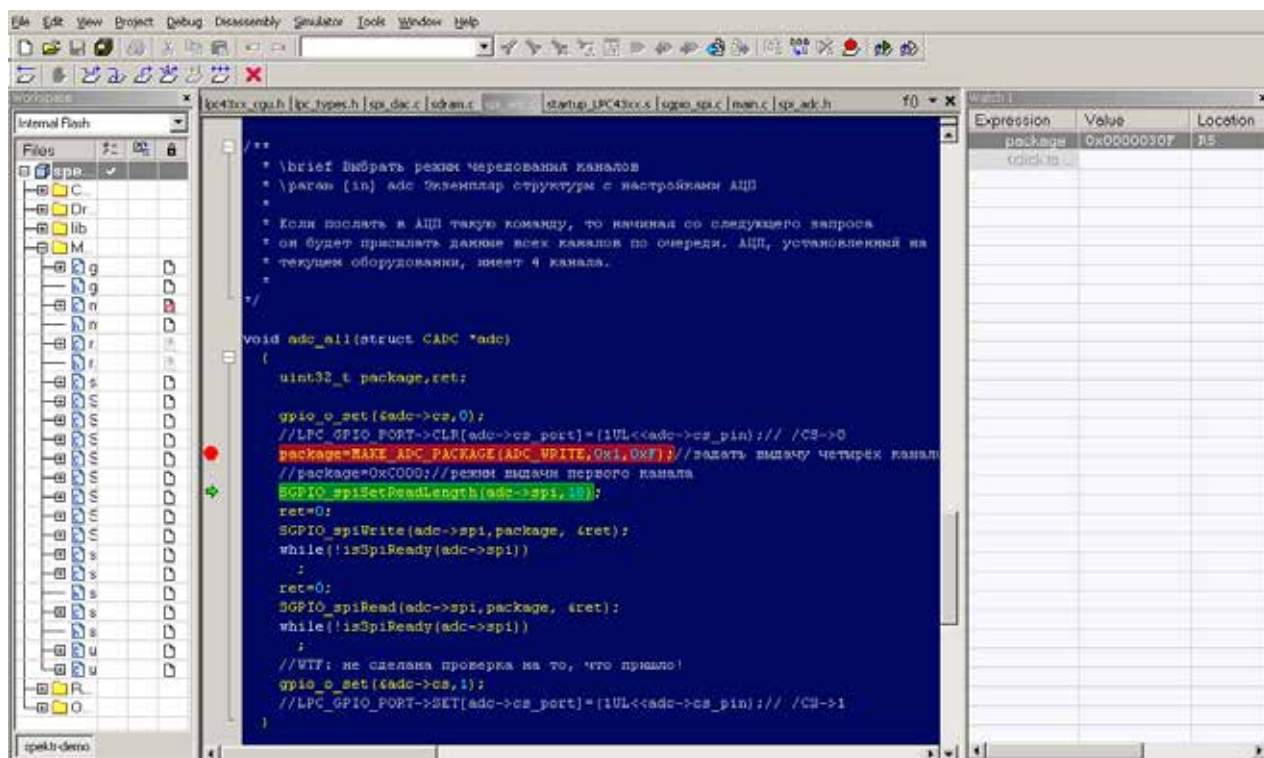


Рисунок 146 – Формирование пакета данных

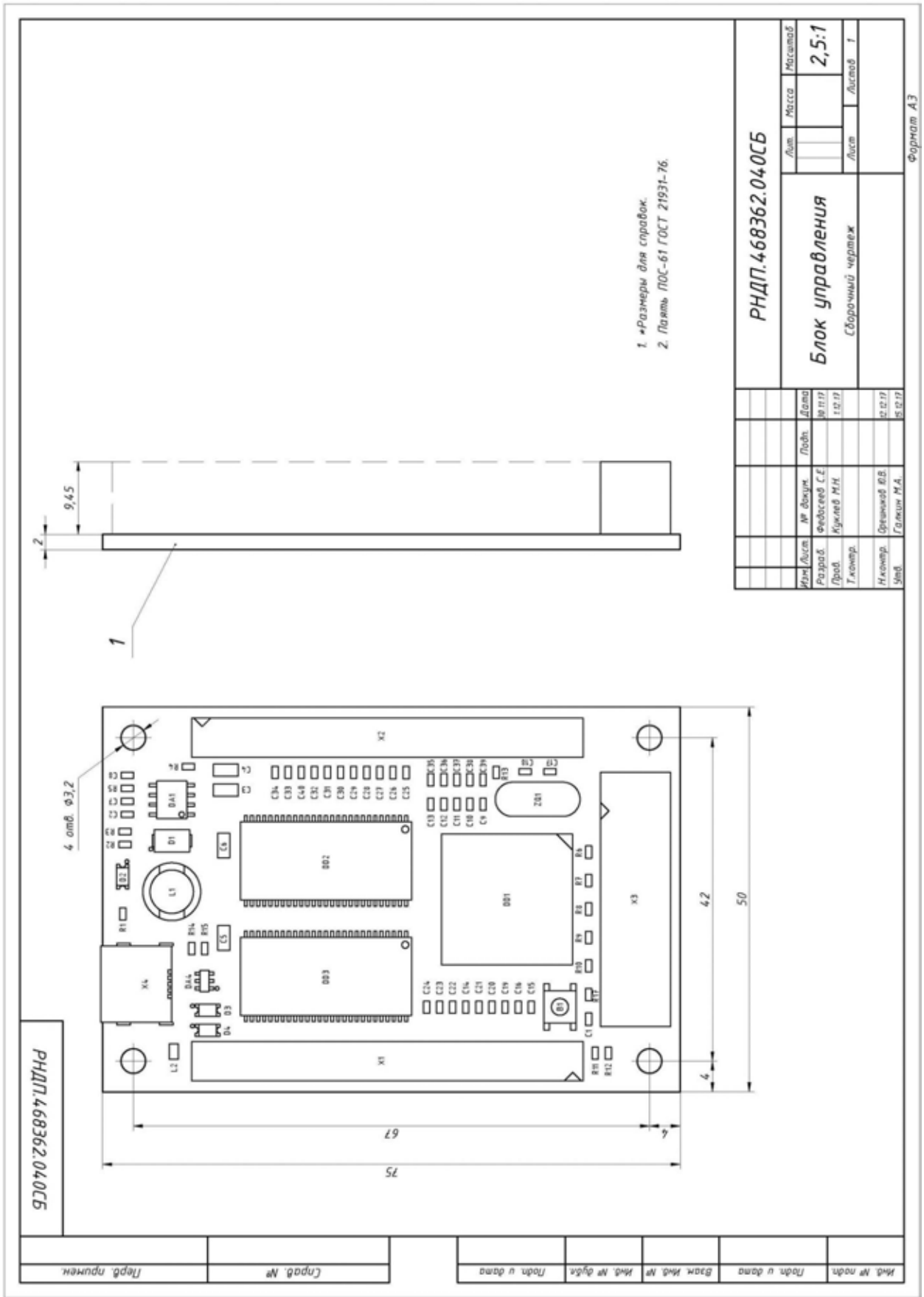


Рисунок 147 – Сборочный чертеж блока управления

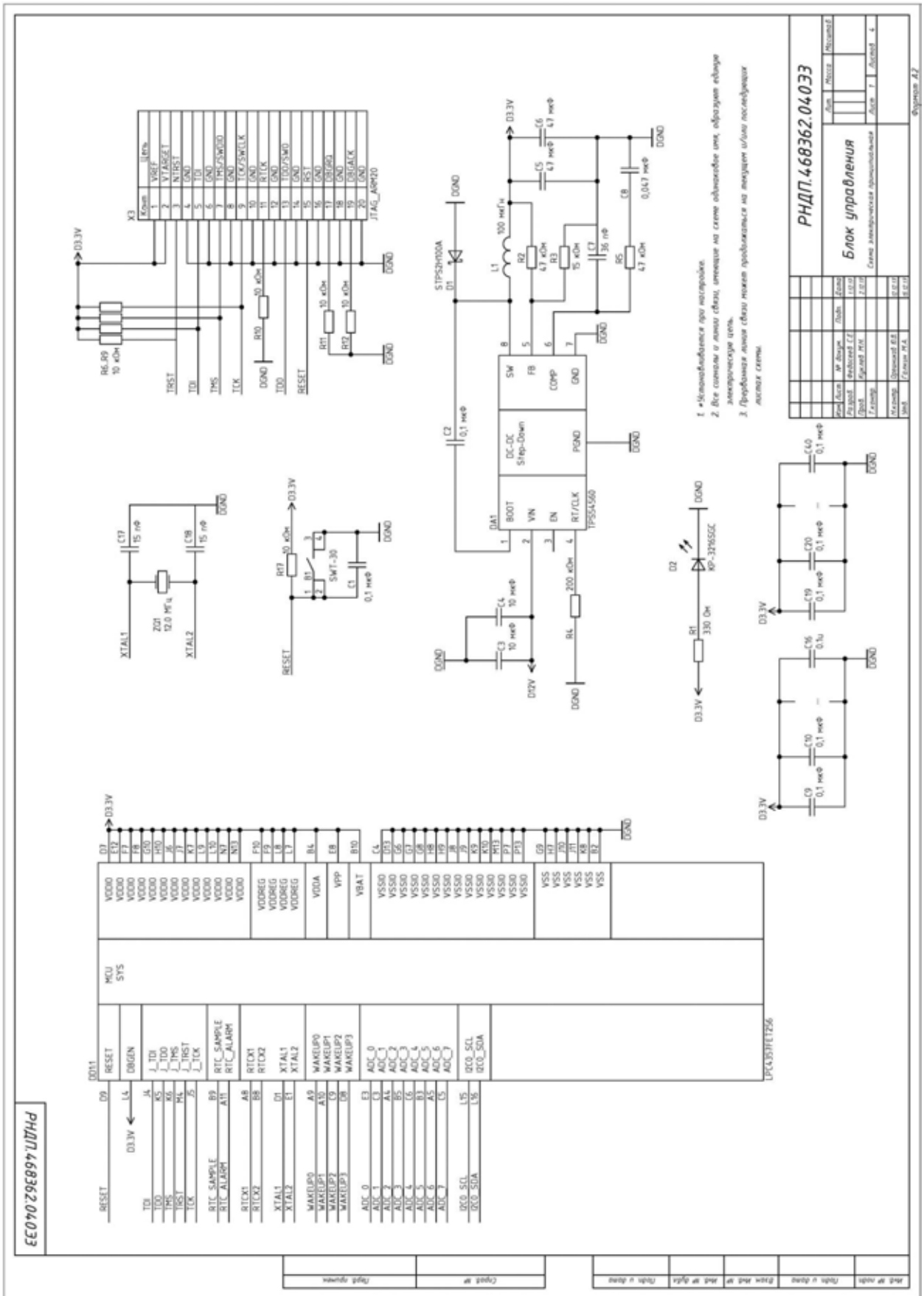


Рисунок 148 – Схема электрическая принципиальная блока управления



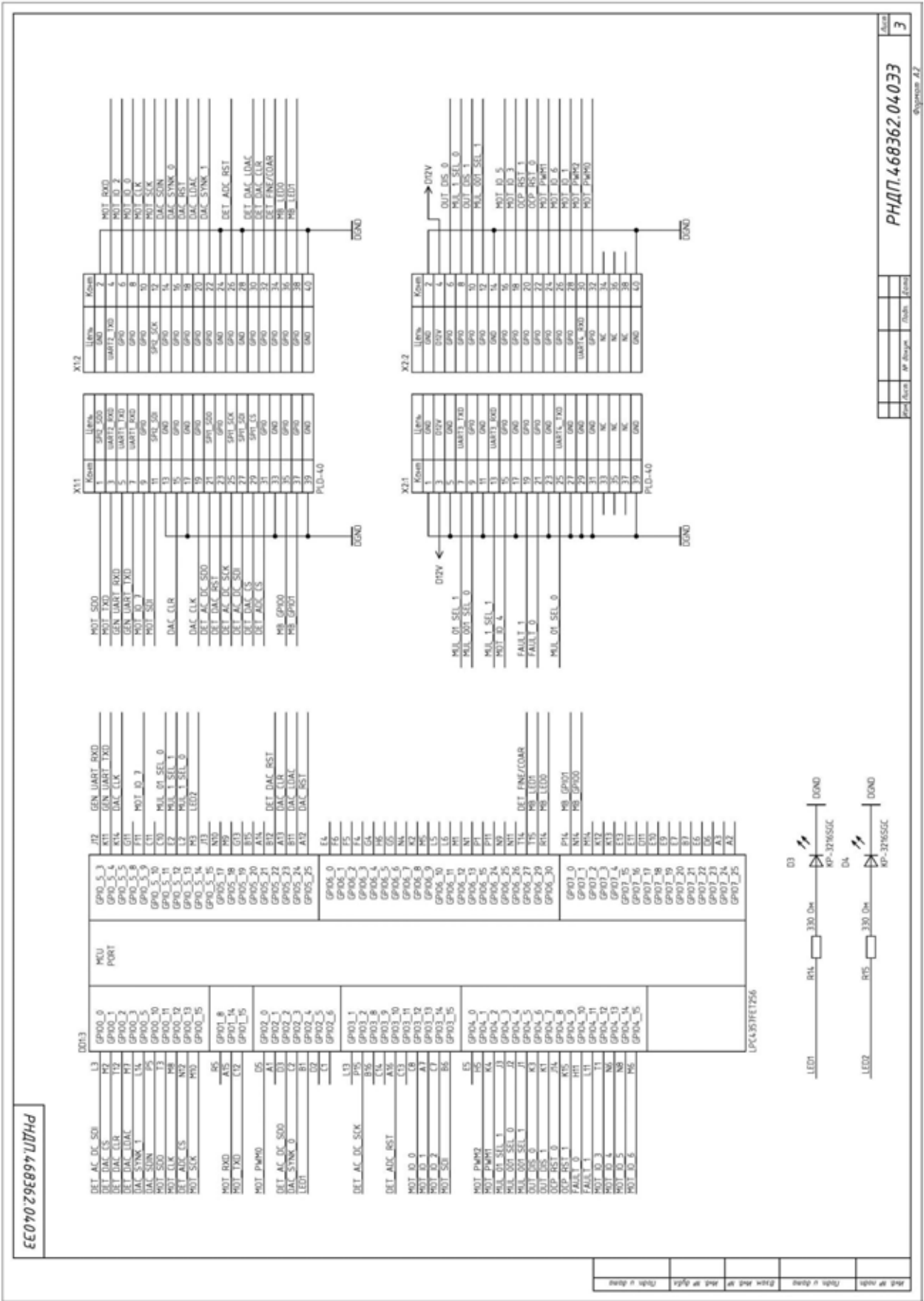


Рисунок 150 – Схема электрическая принципиальная блока управления

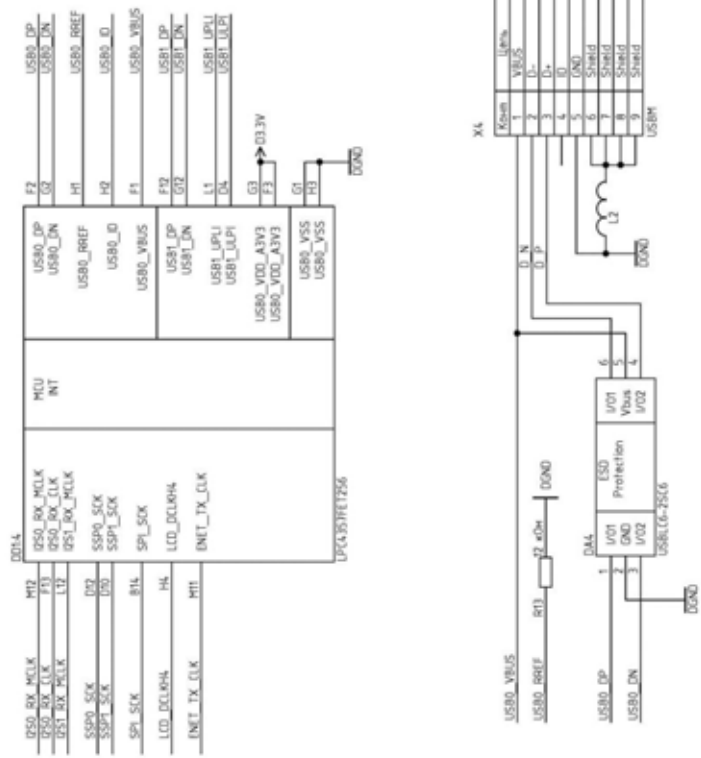


Рисунок 151 – Схема электрическая принципиальная блока управления



## 12.5 Схема электропитания.

В портативном твердомере предусмотрено два режима работы – работа от бытовой сети с напряжением 220 Вольт и автономный режим работы от аккумулятора с напряжением 24В и емкостью 10А/ч. Для питания различных узлов прибора принято решение использовать различные блоки питания, установленные в основном блоке электроники. Для актюатора, осуществляющего приложение силы, используется источник питания MDR-100-24, Mean Well Enterprises, Тайвань. Тот же блок питания используется для линейного транслятора, осуществляющего движение измерительного модуля. Этот источник обладает низким уровнем пульсаций, что позволяет использовать его для управления моторами без дополнительной фильтрации. Наличие механической подстройки позволяет подобрать оптимальный режим работы. Присутствует защиты от короткого замыкания, перегрузки, перенапряжения и перегрева. Для питания всей остальной электроники принято решение использовать AC-DC преобразователи KAMN3012, производства Chinfu Electronics, Китай. Это блоки питания обладают низким уровнем шума и пульсаций выходного напряжения. Выходное напряжение 12 Вольт с возможностью механической подстройки. В приборе устанавливаются два блока питания последовательно, с заземлением средней точки. Таким образом, имеется биполярное напряжение питания +12В и -12В.

Было рассмотрено и проведено моделирование двух возможных вариантов интеграции аккумуляторной батареи в общую систему электропитания. В первом варианте изображен на рисунке 152 для получения напряжений +12В и -12В используется DC/DC преобразователь TEN 20-2411, производства Traco Power, Швеция. Он подключается непосредственно к аккумуляторной батарее. Для конфигурирования различных источников питания используются диоды Шоттки.

Второй вариант подключения аккумуляторной батареи изображен на рисунке 153. Он подразумевает использование инвертора для преобразования напряжения аккумулятора в сетевое. В качестве инвертора был выбран А302-150-F3, Mean Well Enterprises, Тайвань. В нем присутствуют защита от переплюсовки, защита от короткого замыкания, перегрузки, перенапряжения и перегрева. Важной особенностью данного устройства является возможность автоотключения при снижении входного напряжения, это защищает от погрешностей, связанных с работой прибора при чрезмерно разряженном аккумуляторе.

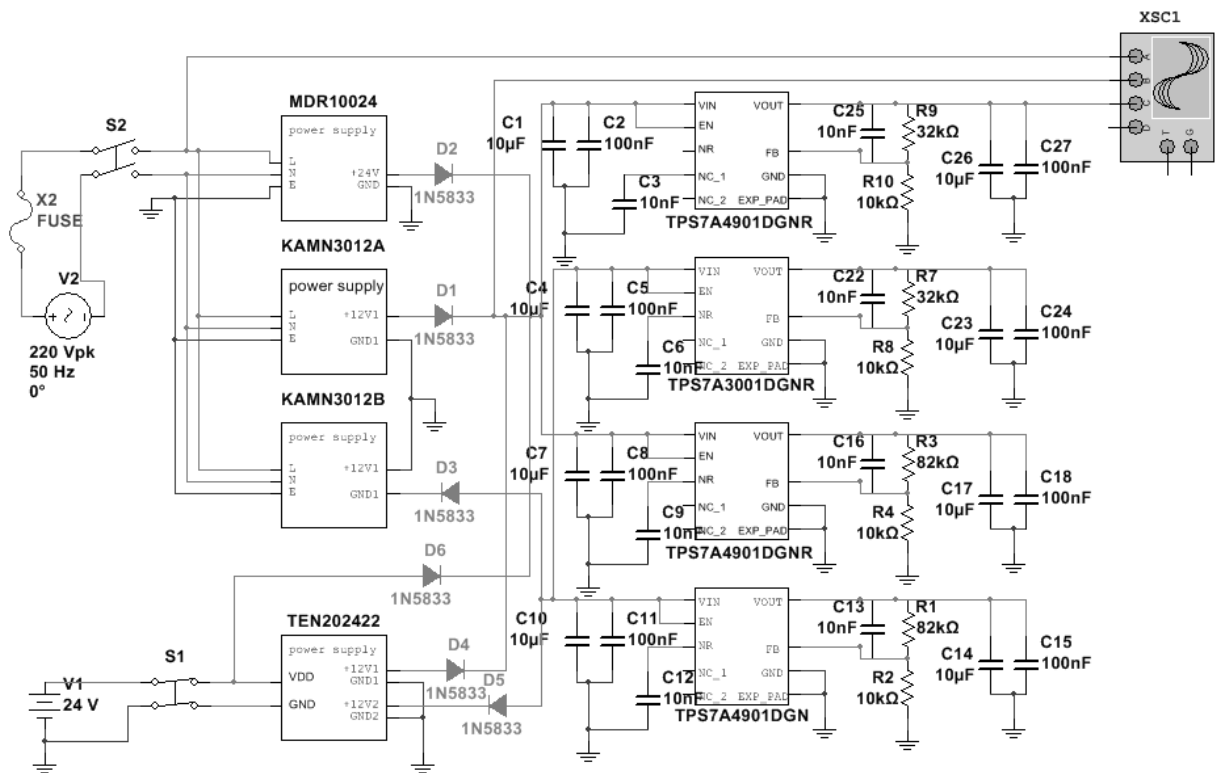


Рисунок 152 – Включение аккумулятора с помощью преобразователя

На рисунке 154 изображены осциллограммы, снятые с математической модели схемы электропитания портативного твердомера. Канал А – сильно зашумленный сетевой сигнал бытовой сети 220В. Канал Б – выходной сигнал модели блока питания KAMN3012. Уровень шума и пульсаций около 100мВ.

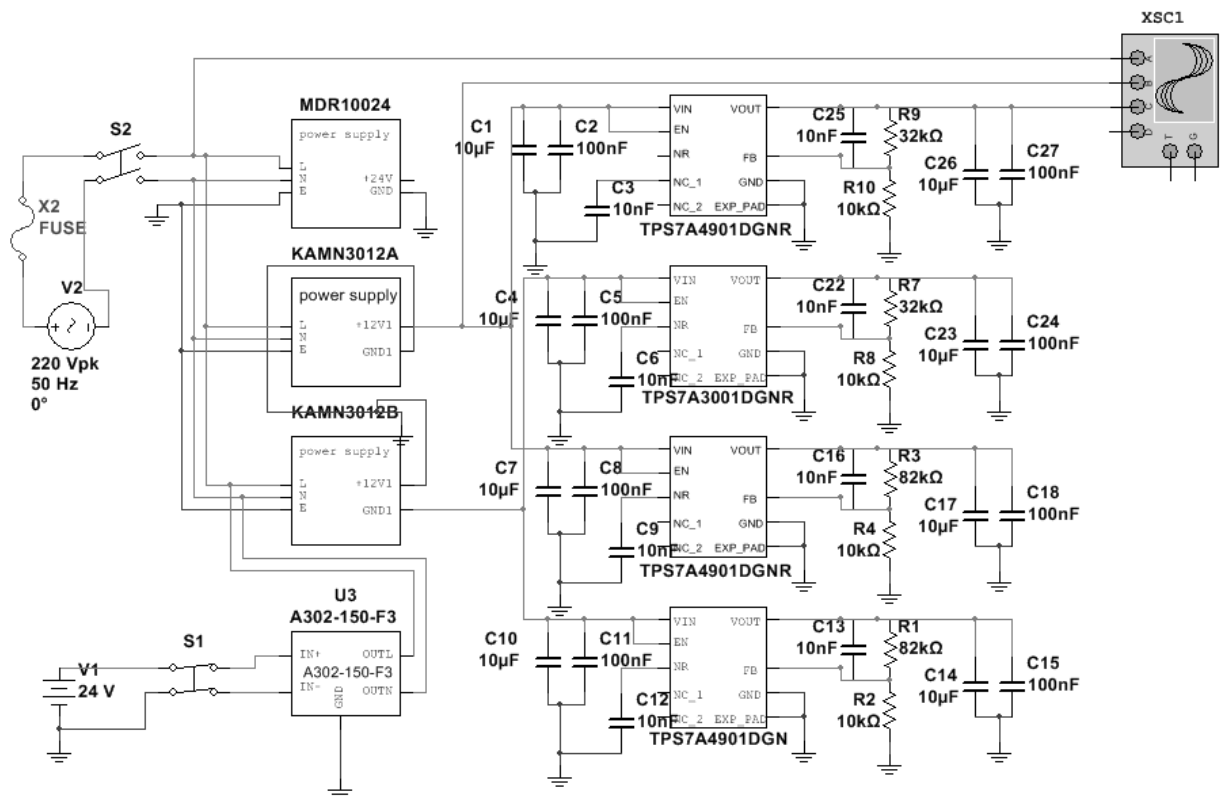


Рисунок 153 – Включение аккумулятора с помощью инвертора

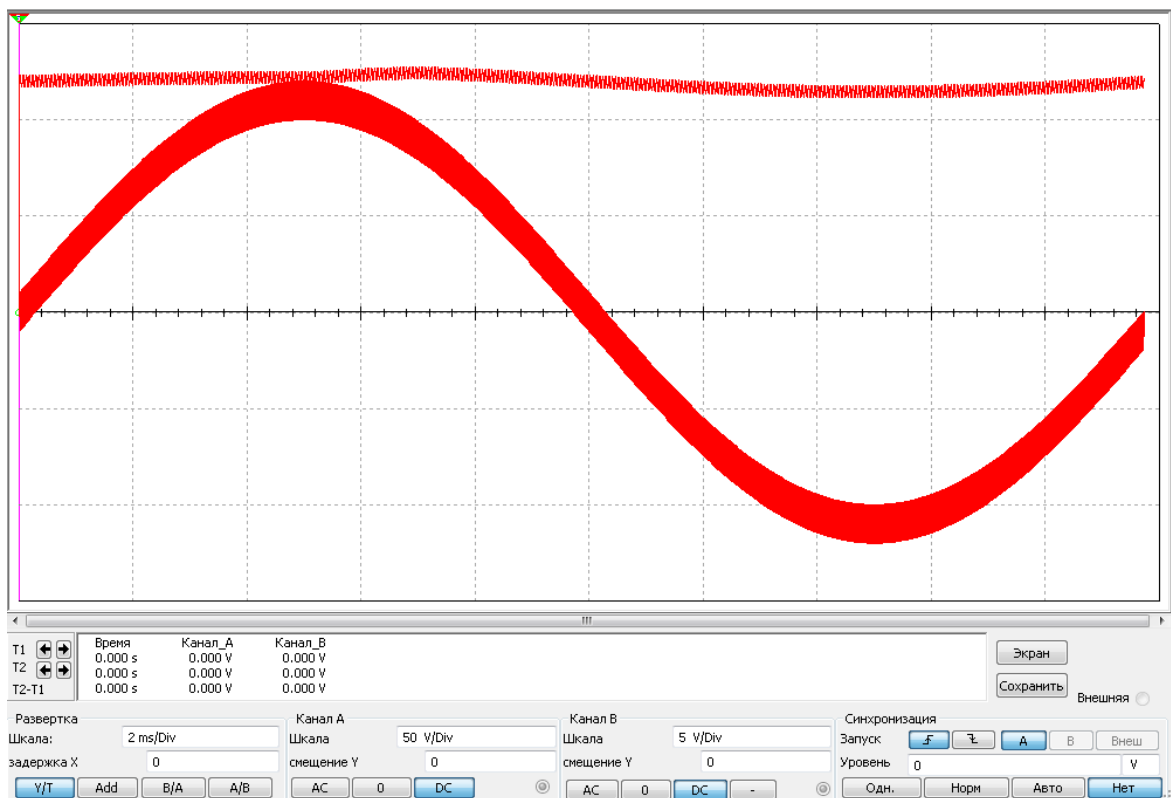


Рисунок 154 – Осциллограммы сетевого сигнала и сигнала с выхода БП KAMN3012

Так как в портативном твердомере уделяется большое внимание точности, было принято решение установить малозумящие линейные регуляторы положительного и отрицательного напряжения TPS7A4901DGNT и TPS7A3001DGNT для дополнительной фильтрации напряжения, питающего аналоговые тракты схем регистрации силы и смещения. Аналогичные регуляторы используются и для преобразования +12В и -12В в +5В и -5В соответственно.

На рисунке 155 изображена смоделированная осциллограмма сигнала на выходе блока питания MDR-100-24 (Канал А) и сигнала на выходе регулятора TPS7A4901DGNT (Канал В). Уровень шумов и пульсаций источника, предназначенного для управления моторами, составляет около 150мВ, что удовлетворяет предъявляемым требованиям. Шумовая дорожка в питании +12В находится на уровне 30мВ, что так же является хорошим результатом. Аналогичные шумовые дорожки наблюдаются и в напряжениях питания -12В, +5В и -5В. В математическую модель были заложены предельные параметры шумов и пульсаций. В реальной электронной схеме ожидается ещё более низкие показатели. Таким образом, можно сделать вывод, что сетевые помехи и пульсации на показаниях прибора сказываться не будут.

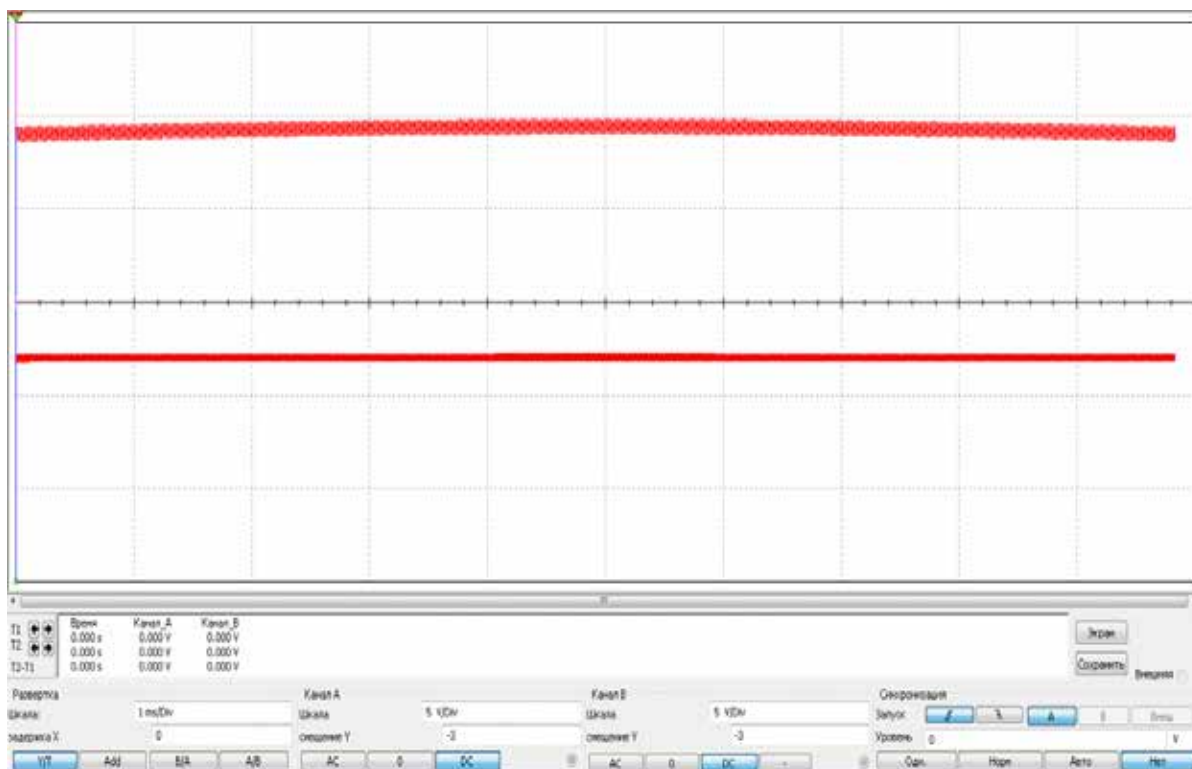


Рисунок 155 – Осциллограмма итоговых напряжений питания +24В и +12В

При моделировании автономной работы прибора не было обнаружено существенных отличий в уровне шумов и пульсаций от работы с подключением к сети. И в случае подключения аккумуляторной батареи через DC/DC преобразователь TEN 20-2411, и в случае использования инвертора А302-150-F3, шумовые составляющие в итоговых напряжениях питания аналогичны.

## 12.6 Моделирование работы модуля беспроводной связи

Разрабатываемый экспериментальный образец iPoRTH и модуль оперативного контроля имеют металлический корпус и это создает определенные трудности для обеспечения беспроводной связи модулей с управляющим и собирающим данные персональным компьютером. Учитывая предполагаемое промышленное применение iPoRTH размещение антенн приемопередающего модуля на или вне корпуса прибора было признано не целесообразным. При размещении радиомодуля внутри сплошного металлического корпуса существенно уменьшает радиус устойчивой радиосвязи и может сделать радиосвязь принципиально невозможной. Поэтому методами численного моделирования были произведены расчеты напряженности поля в дальней зоне при различной форме и размере радиопрозрачных окон, расположенных в задней крышке iPoRTH.

Было рассмотрено несколько вариантов исполнения задней крышки iPoRTH проведено сравнение с конфигурацией, при которой антенна приемопередатчика, работающего в диапазоне 2,4 ГГц (среднее значение рабочей частоты устройств, работающих по протоколу Bluetooth) расположена вне металлического корпуса iPoRTH.

На рисунке 156 представлена картина электромагнитного поля вне iPoRTH при наличии радиопрозрачного квадратного отверстия со стороной 2 см. Bluetooth антенна в данных расчетах имела длину 3 см и была расположена перпендикулярно внутренней стенке iPoRTH вблизи верхней крышки.

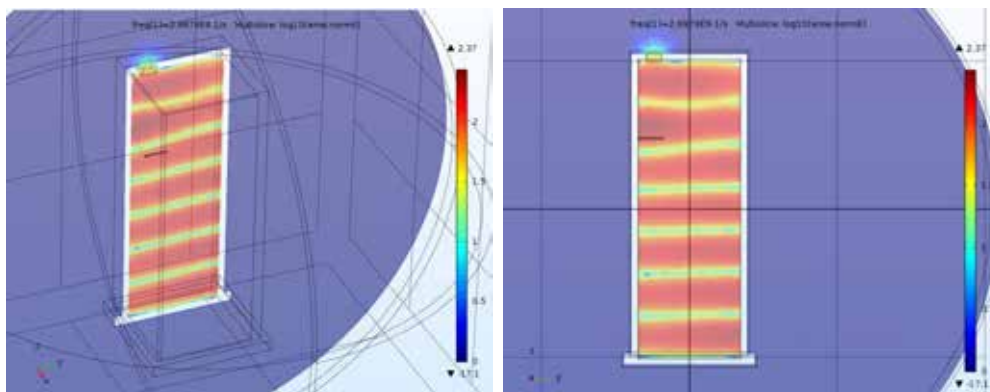


Рисунок 156 – Электромагнитное поле внутри и вне iPoRTH, квадратное отверстие со стороной 2 см

Такие же расчеты были произведены для трех отверстий со стороной 2 см расположенных в линию, рисунок 157.

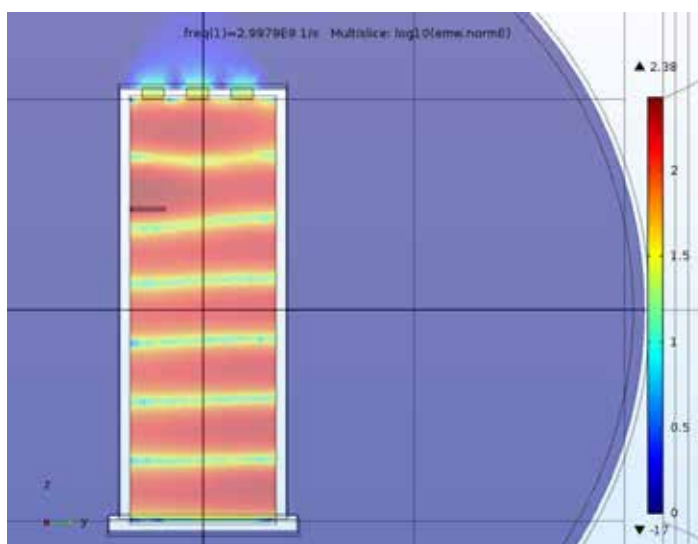


Рисунок 157 – Электромагнитное поле внутри и вне iPoRTH, три отверстия со стороной 2 см расположенные в линию

Из результатов расчетов следует, что использование отверстий со стороной 2 см не позволяет получить существенного поля в дальней зоне от iPoRTH, а значит такая конфигурация не позволит устанавливать взаимосвязь с iPoRTH на расстояниях, гарантированных стандартом Bluetooth.

Увеличение размера стороны квадрата до 3 см существенно улучшило ситуацию, но все равно основное поле в виде стоячей волны, по-прежнему, концентрируется внутри металлического корпуса iPoRTH, рисунок 158.

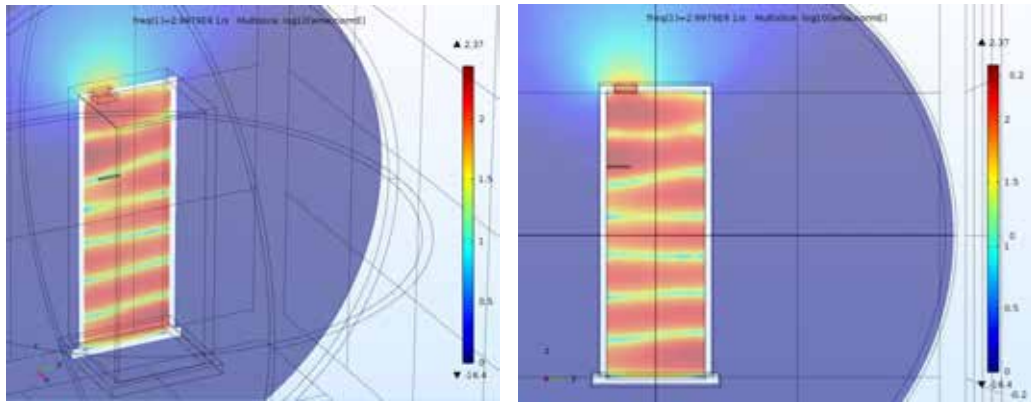


Рисунок 158 – Электромагнитное поле внутри и вне iPoRTH, квадратное отверстие со стороной 3 см

Рабочим вариантом радиопрозрачного отверстия оказалось квадратное отверстие со стороной 4 см, рисунок 159.

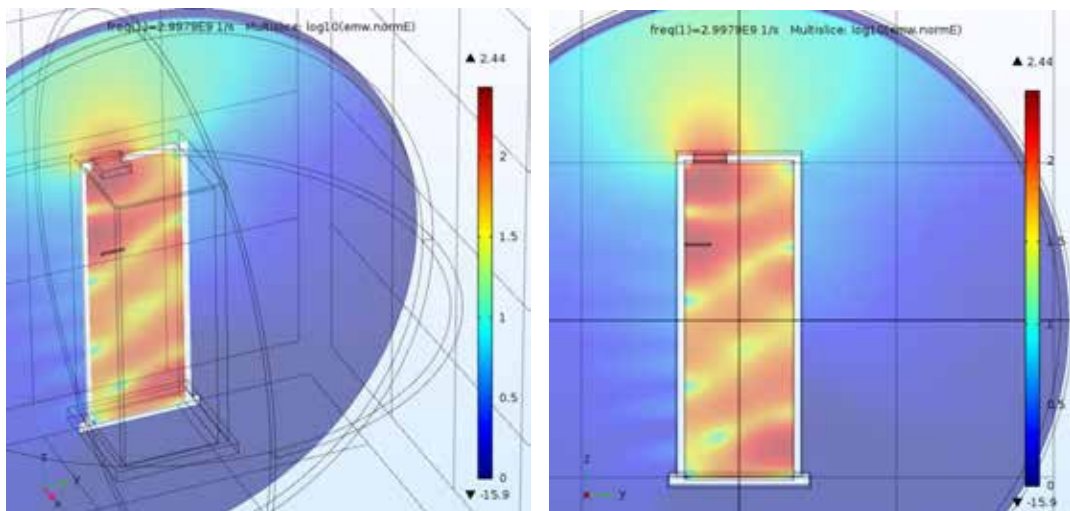


Рисунок 159 – Электромагнитное поле внутри и вне iPoRTH, квадратное отверстие со стороной 4 см

Для завершения анализа возможных путей обеспечения радиосвязи внутреннего Bluetooth модуля с Bluetooth модулем управляющего мобильного устройства, был произведен расчет для линейных антенн, связывающих внешнее и внутренне пространство iPoRTH, рисунок 160. Из расчетов следует, что антенна общей длиной 12 см вполне может использоваться для вывода и ввода электромагнитного поля во внутреннее пространство iPoRTH. Однако ее эффективность существенно хуже квадратного отверстия со стороной 4 см.



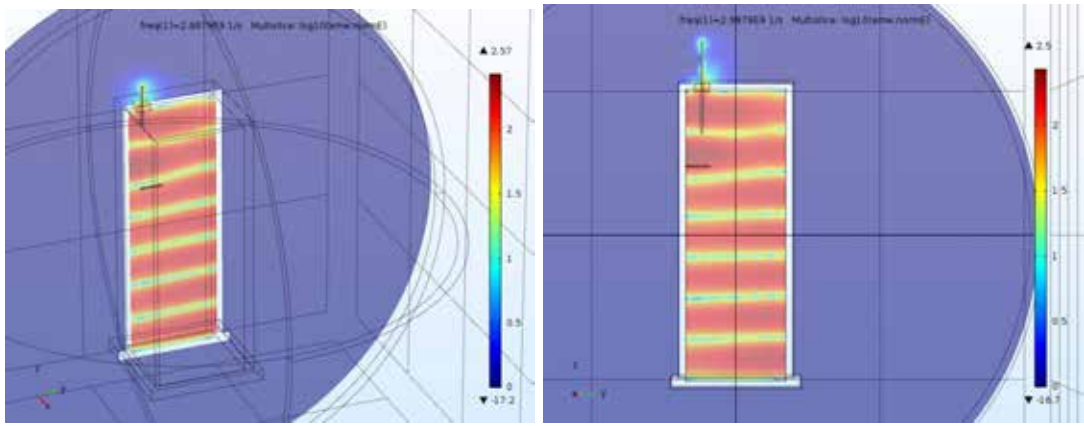


Рисунок 160 – Электромагнитное поле внутри и вне iPoRTH, через квадратное отверстие со стороной 2 см продеты токопроводящие стержни длиной 6 и 12 см, связывающие внешнее и внутреннее пространство iPoRTH

Для численного сравнения эффекта экранировки, в той же среде численного моделирования были произведены расчеты поля вне и внутри iPoRTH при расположении антенны на внешней поверхности боковой стенки iPoRTH, рисунок 161.

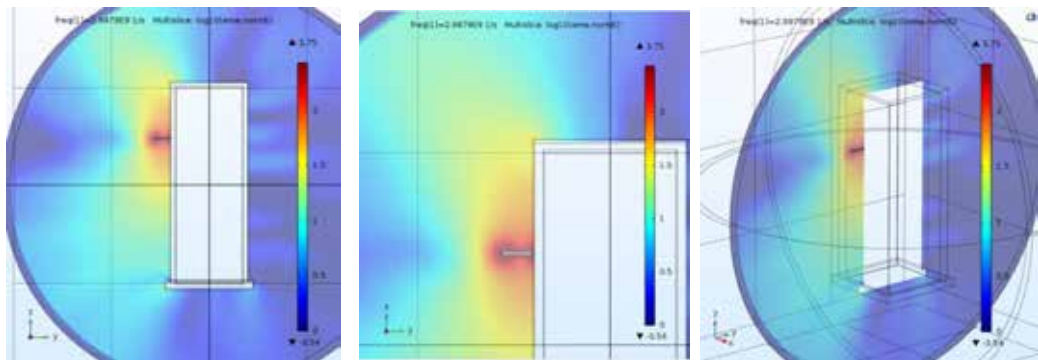
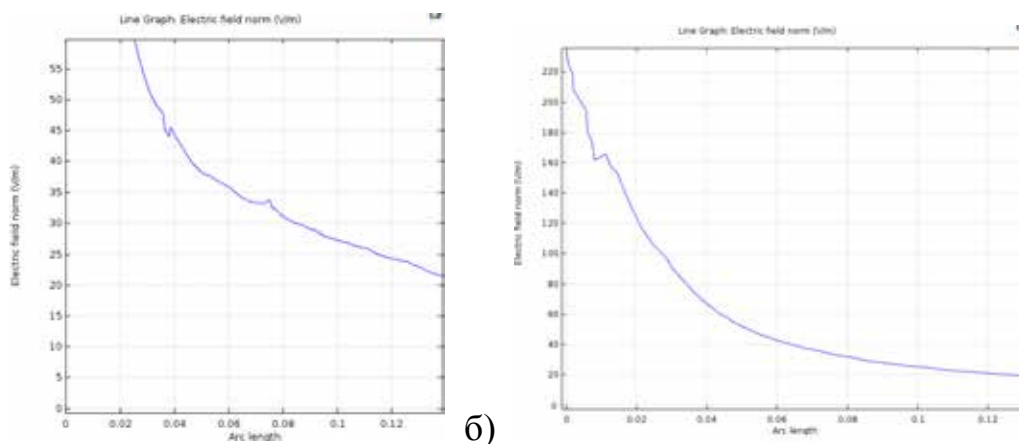


Рисунок 161 – Электромагнитное поле внутри и вне iPoRTH при расположении антенны вне корпуса

Выбрав направления, соответствующие максимуму диаграммы направленности для отверстия размером 4 см и внешнего расположения антенны, были построены зависимости напряженности электромагнитного поля от расстояния, рисунок 162.



а) б)  
 Рисунок 162 – Зависимость электромагнитного поле вне iPoRTH от расстояния при расположении антенны вне корпуса (а) и внутри корпуса при размере квадратного отверстия 4 см (б)

Из произведенных расчетов следует, что несмотря на существенно меньшее значение вытекающей за пределы корпуса iPoRTH мощности электромагнитного излучения при расположении антенны Bluetooth передатчика, в направлении максимумов диаграммы направленности напряженности электромагнитных полей в дальней зоне имеют сопоставимые значения. Исходя из принципа взаимности, это означает, что напряженность внешнего электромагнитного поля, проникающего внутрь корпуса iPoRTH, будет иметь аналогичную величину и радиосвязи внешнего и внутреннего модулей при их правильной ориентации будет близка к заявленным значениям дальности связи по протоколу Bluetooth. Для современных устройств, работающих по протоколу Bluetooth без экономии потребляемой мощности, эта дистанция может достигать 100 при скорости передачи данных до 24 Мб в секунду. Такого рода цифры можно считать вполне приемлемыми для осуществления индентационных измерений в полевых и заводских условиях. Более того при работе в реакторном зале АЭС такая рабочая дистанция является достаточной для размещения оператора производящего измерения вне радиационно опасной зоны во время множественных и долговременных измерений.

Проведенное моделирование продемонстрировало возможность размещения модуля радиосвязи внутри корпуса iPoRTH при условии наличия в корпусе iPoRTH радиопрозрачных отверстий со стороны более 4 см.

### **Результаты и выводы раздела**

В процессе выполнения текущего этапа ПНИЭР была выполнена разработка, численное моделирование радиоэлектронного оборудования необходимого для полнофункциональной работы iPoRTH и изготовлены критически важные узлы требуемого РЭО. Результаты моделирования и исследовательские испытания критически важных узлов подтвердили работоспособность выбранного подхода и готовность изготовленного оборудования к совместным испытаниям предусмотренным следующим этапом ПНИЭР. Проведенное численное моделирование работы модуля беспроводной связи продемонстрировало возможность его размещения внутри корпуса iPoRTH при условии наличия в корпусе радиопрозрачных окон.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.12 ПГ и п.3.12 ТЗ.

### 13 Разработка ЭКД для изготовления макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH

Проанализированные технические решения системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца iPoRTH, а также расчет деформации упомянутых элементов привели к разработке эскизной конструкторской документации макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH в следующем составе:

- Схема деления модулей измерительных структурная ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000 Е1;

- Чертеж общего вида ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000 ВО;
- Чертеж Пластина ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.001;
- Чертеж Держатель актюатора ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.002;
- Чертеж Пластина-ухо ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.003;
- Чертеж Палец ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.004;
- Чертеж Пластина корпуса нижняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.001;
- Чертеж Стенка боковая корпуса ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.002;
- Чертеж Пластина корпуса верхняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.003;
- Чертеж Опора ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.001;
- Чертеж Опора 1 ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.002;
- Чертеж Стенка боковая стойки ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.003;
- Чертеж Стенка задняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.004;
- Чертеж Планка переходная ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.005;
- Чертеж Зажим профилометра ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.006.

Данная документация приведена в Приложении Е.

## 14 Изготовление макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTN

Конструкция экспериментального образца индентационного модуля iPoRTN предполагает вариативность системы крепления и позиционирования измерительного модуля, поэтому сборка и настройка измерительного модуля может быть осуществлена независимо и без использования измерительного модуля. Данный модуль так же используется для крепления и позиционирования оптического микроскопа и конфокального оптического профилометра, оснащенных собственной системой крепления и подвода, монтируемой на то же посадочное место, что и индентационный модуль

Следует отметить, что измерительный модуль в силу особенности конструкции может быть использован для осуществления измерений на произвольных плоских поверхностях путем его непосредственной установки на исследуемую поверхность. Единственное ограничение для такого рода измерений – диапазон максимальных нагрузок. Максимальное усилие при измерительном индентировании в этом случае не может превышать веса индентационного модуля. В данном варианте исполнения эта величина ограничена 100 Н (вес модуля до 15 кг). При необходимости осуществления измерений с большими нагрузками модуль может быть легко загружен путем одевания на его корпус ряда полых грузов с центральным отверстием большего размера корпуса, но меньшем размера крепежного фланца. При этом максимальное индентационное усилие может достигать до 3 кН, при условии суммарного веса загружающих элементов более 350 кг.

На данном этапе работ собиралась и испытывалась система позиционирования с магнитным удержанием на поверхности исследуемого изделия (результаты испытания используемых магнитных держателей представлены в разделе 16). Общий вид системы крепления и позиционирования без удерживающих магнитов представлен на рисунке 163.

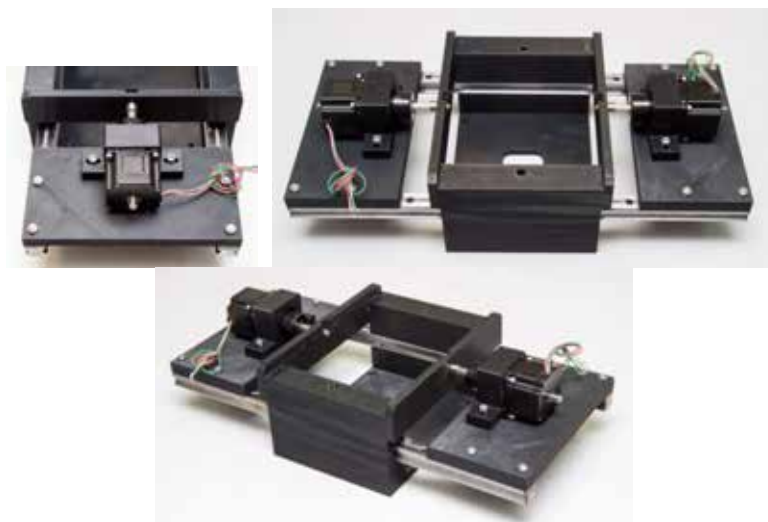


Рисунок 163 – Этапы сборки системы крепления и позиционирования экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH

Наличие плоских поверхностей на блоке позиционирования и крепления существенно упрощает его сборку и не требует какой-либо специального оборудования для сборки и настройки системы крепления и позиционирования. Вид системы позиционирования в момент установки удерживающих магнитов представлен на рисунке 164.

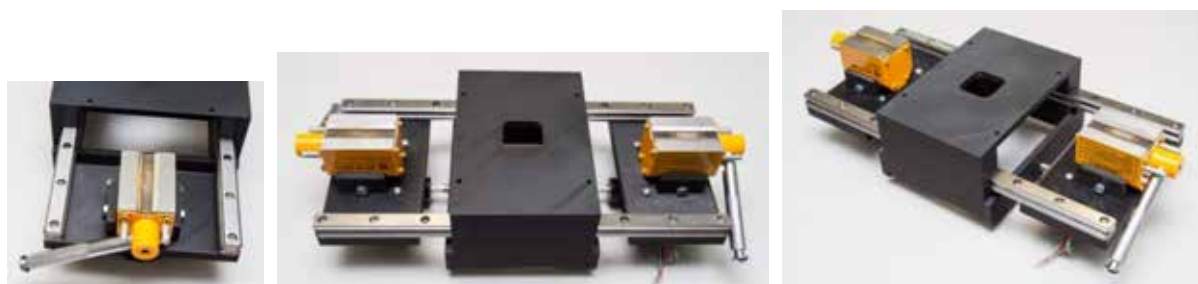


Рисунок 164 – Этапы установки удерживающих магнитов в систему крепления и позиционирования экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH

После проверки плавности и величины рабочего хода системы позиционирования была произведена установка интентационного измерительного модуля iPoRTH на его рабочее место, рисунок 165. Модуль легко устанавливается в положенное место при произвольной взаимной ориентации модулей. Возможность поворота измерительного модуля на 90,

180 и 270 градусов при установке была предусмотрена конструкцией и позволяет при использовании наконечников не сферической формы менять взаимную ориентацию граней индентора и образующих элементов испытываемой конструкции, данная возможность существенна при исследовании материалов и изделий со значительными внутренними напряжениями, имеющими анизотропный характер.



Рисунок 165 – Этапы установки удерживающих магнитов в систему крепления и позиционирования экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH

Важной эксплуатационной особенностью разрабатываемого экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH является автоматизированный характер проводимых измерений. Заложенный уровень роботизации предполагает наличие ряда сенсорных систем и ограничительных механизмов, исключающих непреднамеренное повреждение изделия и прибора в ходе осуществляемых исследовательских испытаний. Представленные на рисунке 166 изображения демонстрируют факт мягкого касания упорного кольца iPoRTH в процессе подвода подвижного модуля iPoRTH, содержащего силочувствительную ячейку и датчик перемещения, к поверхности на которой установлена система крепления и позиционирования экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH.



Рисунок 166 – Изображение экспериментального образца измерительного модуля iPoRTN и измерительного сфероконического индентора, закрытого упорным элементом в контакте с поверхностью объекта, на котором установлена система крепления и позиционирования

### **Результаты и выводы раздела**

Разработанная и изготовленная система крепления продемонстрировала совместимость с индентационным модулем iPoRTN и возможность их совместной установки на исследуемые цилиндрические и плоские магнитные изделия. Все предусмотренные ЭКД функциональные возможности реализованы и соответствуют требованиям КД на ПНИЭР.

Акт изготовления макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTN приведен в Приложении Ж.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.14 ПГ и п.3.14 ТЗ.



15 Разработка Программы и методик исследовательских испытаний макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца iPoRTH

Программа и методики исследовательских испытаний макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца iPoRTH приведены в Приложении И.

## 16 Исследовательские испытания макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей

Выбранный вариант реализации системы крепления и позиционирования экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH базируется на использовании магнитных держателей, поэтому именно эти элементы были подвергнуты наиболее тщательному изучению. На рисунке 167 представлено изображение основных элементов испытательного стенда на основе универсальной испытательной машины работающей на отрыв магнитного держателя от плоских металлических тестируемых деталей.

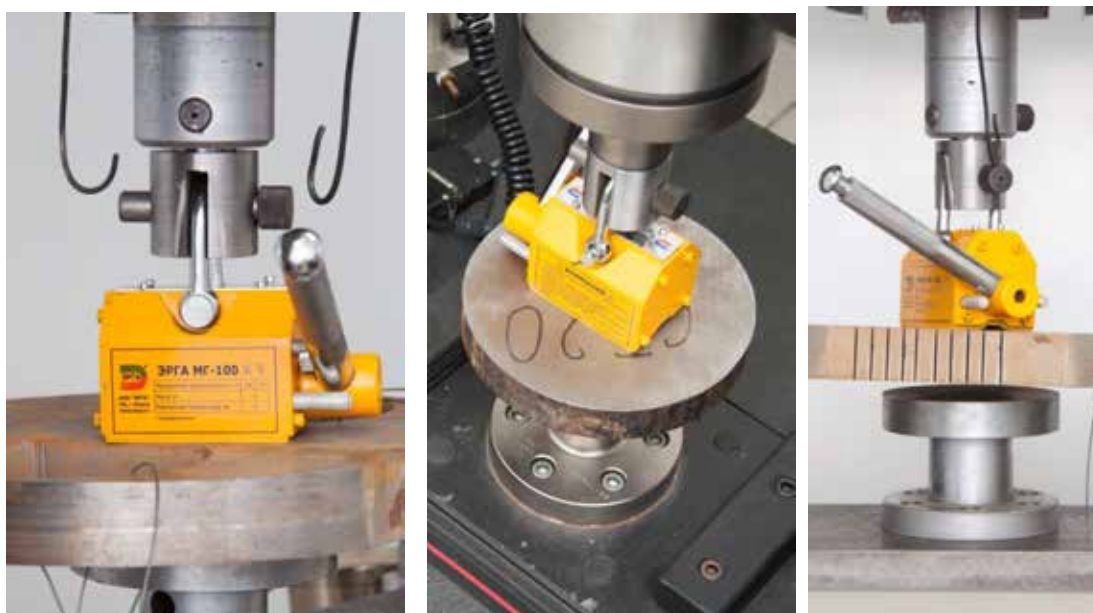


Рисунок 167 – Экспериментальные исследования силы удержания единичного магнита, используемого в модуле крепления и позиционирования измерительного индентационного модуля iPoRTH

Полученные значения силы отрыва магнита от плоской грубо обработанной поверхности из ферромагнитного материала (сталь 20) колебалось в интервале (2,2-2,7) кН, что при использовании двух магнитов, как предусмотрено в конструкции iPoRTH, обеспечивает полуторакратный запас по силе удержания (5 кН при требуемых 3 кН). Имитационные эксперименты с двумя магнитными держателями подтвердили данное предположение, рисунок 168.



Рисунок 168 – Экспериментальные исследования силы удержания обеспечиваемой парой магнитов используемых в модуле крепления и позиционирования измерительного индентационного модуля iPoRTH

При использовании двух модулей испытания проводились по факту удержания требуемой нагрузки, без достижения отрыва магнитов от образца. Во всех экспериментах при усилии на отрыв 4кН контакт магнитов с образцом не был нарушен. Проведенные испытания продемонстрировали достаточную для iPoRTH силу удержания на плоских стальных образцах толщиной более 2 см. Аналогичные результаты, согласно паспорту магнита, гарантированно будут достигаться на цилиндрических образцах диаметром более 1 м. для образцов меньшего диаметра и меньшей толщины усилие удержания падает.

Испытания, произведенные с отрезком трубы диаметром 160 мм и толщиной стенок 10мм, подтвердили факт уменьшения силы удержания и указали на целесообразность при работе с трубами диаметром менее 1 м использование цепных или ременных стяжек для крепления экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH. Испытания проводились по схеме отраженной на рисунке 169 и дали величину силы удержания на уровне (0,5-0,6) кН на один магнит, или в пересчете на два – около 1кН.



Рисунок 169 – Исследования силы удержания, обеспечиваемой одним магнитом при его креплении к стальной трубе диаметром 160мм с толщиной стенок 10мм

Таким образом, силовые испытания показали пригодность всех изготовленных модулей и закупленных изделий к работе в составе экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH и системы его крепления и позиционирования. Данный результат подтверждает правильность произведенных расчетов и позволяет приступить к сборке и исследовательским испытаниям экспериментального образца индентационного модуля iPoRTH и системы его крепления и позиционирования.

После окончательной сборки всего прибора в целом были произведены исследовательские испытания, касающиеся работоспособности основных систем iPoRTH при эксплуатации изделия в условиях реального производственного помещения с типичными металлическими изделиями, рисунки 170 и 171.

Была проверена мобильность экспериментального образца измерительного модуля iPoRTH, легкость его позиционирования при выключенных магнитных держателях и отсутствие значимой деформации посадочной поверхности системы крепления и позиционирования при ее установки на изделия не имеющие идеально плоскую и цилиндрическую форму. Фланец измерительного модуля iPoRTH хорошо примыкал к ответной части и для его надежного закрепления не требовалось усилие, превышающее 6 кН, по 1,5 кН на каждый крепежный винт.



Рисунок 170 – Изображение экспериментального образца измерительного модуля iPoRTN установленного на плоский металлический лист, магнитные держатели находятся в рабочем положении.



Рисунок 171 – Изображение экспериментального образца измерительного модуля iPoRTN установленного на цилиндрическую металлическую заготовку, магнитные держатели находятся в рабочем положении

Таким образом, можно констатировать успешность разработки, сборки и наладки системы крепления и позиционирования экспериментального образца измерительного модуля iPoRTN. Разработанная система удовлетворяет всем кинематическим и позиционным требованиям, предъявляемым к ней по ТЗ на ПНИЭР. Силовые, динамические и

метрологические испытания системы крепления и прибора в сборе будут произведены на следующих этапах выполняемой работы

### **Результаты и выводы раздела**

Проведенные испытания продемонстрировали соответствие достигнутых функциональных характеристик требованиям ТЗ и подтвердили возможность использования системы магнитного удержания iPoRTH на поверхности плоских и цилиндрических ферромагнитных заготовок. Была подтверждена целесообразность использования цепных или ременных стяжек при работе с тонкостенными трубами, заготовками малого диаметра и немагнитными образцами.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.16 ПГ и п.3.16 ТЗ.

Акт и протокол испытаний макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей приведены в Приложении К.

## 17 Модернизация станда РМЦ-1000 для изготовления образцов крупногабаритных труб

Разработка экспериментального образца iPoRTH, предназначенного для контроля механических свойств машиностроительных изделий и металлургической продукции, представляется важной задачей плотно взаимосвязанной с повышением эффективности и развитием металлургического производства на ОАО «Тяжпрессмаш». Без возможности оперативного контроля, прямо в процессе металлургического производства изготавливаемой продукции трудно совершенствовать технологию непрерывного литья бесшовных полых изделий и гарантировать соответствие их прочностных характеристик требованиям заказчика.

Для развития предприятия ОАО «Тяжпрессмаш» необходим выбор стратегии, позволяющей производить востребованные изделия с определенными характеристиками, высоким уровнем качества и конкурентоспособной ценой. Для этого нужно затратную часть производства изделий снизить до уровня, при котором рыночная цена на изделие будет выше себестоимости на величину, необходимую для дальнейшей работы и развития предприятия. Одним из видов высокотехнологичной продукции являются цельнотянутые трубы средних и больших диаметров. Потребность в таких трубах имеется у энергетиков, в нефтегазовой и химической промышленности при строительстве АЭС. При этом ключевой характеристикой таких изделий является их прочность и неподверженность взрывному разрушению. Изделия, работавшие при высоких температурах и давлениях, должны проявлять пластичность и исключать возможность катастрофического разращение трубопровода. Ключевой характеристикой позволяющей оценить данное свойство трубопроводов является диаграмма сигма-эпсилон, для измерения которой идеально подходит разрабатываемое оборудование – прибор iPoRTH.

В настоящий момент трубы средних и больших диаметров производятся прокаткой на пильгерстанах или из больших поковок. Достаточно часто они являются предметом импорта. У традиционных методов производства имеются свои недостатки и ограничения. Это ограничения в серийности и типоразмеров, высокая материалоемкость и энергоемкость производства, а также недостаточные прочностные характеристики изделий. В «Тяжпрессмаш» отрабатывается технологический процесс позволяющий уйти от большей части этих недостатков. В основу новой технологии положено использование в качестве заготовки для изготовления трубы центробежной отливки. В качестве оборудования для получения отливки используется печи ДППТ20 и ДСП6 имеющиеся в литейном цехе а также разработанная и изготовленная на предприятии ОАО «Тяжпрессмаш» машина для центробежного литья РМЦ-1000, рисунок 172.

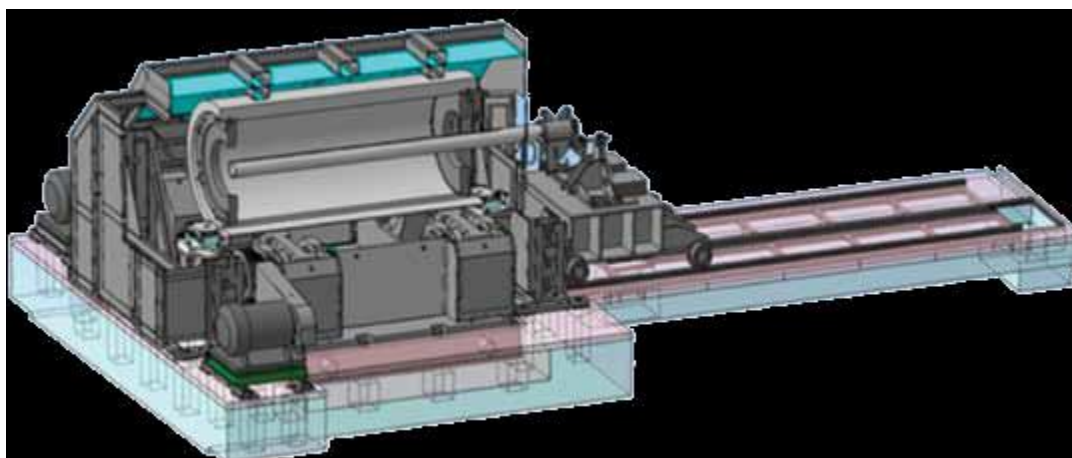


Рисунок 172 – Машина для центробежного литья РМЦ-1000

Опишем кратко основные особенности развиваемой технологии. Перед заливкой на машине проводятся все необходимые работы: Изложница с, предварительно зафутерованными крышками нагревается в печи до рабочей температуры  $\approx 200^{\circ}\text{C}$  и устанавливается на ролики машины; Устанавливается защитный кожух на машину; машина плавно раскручивает изложницу до скорости более 600 об/мин; в изложницу в два этапа



засыпается разделительное покрытие; устанавливается заливочное устройство. Плавка подготавливает металл необходимой марки стали, расплав сливается в ковш. Производится продувка металла аргоном, обработка при помощи трайбаппарата, ферокальциевой проволокой и берется ковшевая проба. Далее металл, в ковше транспортируется к заливочному устройству. Ковш наезжает на воронку заливочного устройства и производится слив металла в изложницу. Контроль необходимого объема металла проводится по крановым весам.

После наполнения изложницы порцией металла кран с ковшом отъезжает, заливочное устройство отодвигается и в окно крышки изложницы загружается утеплительная смесь. Далее на образующую вращающейся изложницы, из форсунок расположенных на кожухе машины и находящихся с внешней стороны изложницы начинает разбрызгиваться вода для охлаждения. По мере охлаждения металл, равномерно распределенный центробежными силами по поверхности изложницы, кристаллизуется. За счет ускоренного, направленного охлаждения, обеспеченного ускоренным отводом тепла с наружной поверхности отливки и утепления шлакообразующей смесью (специальным флюсом) внутренней поверхности отливки, а так же высокой инерционной составляющей, действующей от центробежной силы, обусловленной высокой угловой скоростью вращения, металл отливки имеет оптимальную структуру и химический состав. Все легкоплавкие примеси и примеси, имеющие отличную от металла плотность, уходят на внутреннюю поверхность, под флюс. Благодаря этому материал заготовки имеет и в литом состоянии высокие технические характеристики, этапы работы РМЦ-1000 представлены на рисунке 173.



Рисунок 173 – Этапы производства полого литого изделия

При достижении температуры отливки  $\approx 900^{\circ}\text{C}$  машина плавно останавливается, защитный кожух снимается и изложница удаляется на подставку для снятия крышки. Крышка снимается, и заготовка удаляется из изложницы. Далее в технологическом цикле центробежного литья заготовка в горячем состоянии грузится в термосе в транспортное средство и доставляется к нагревательной печи кузнечного цеха и загружается в печь для подогрева на ковочную температуру. Перед выносом на ковку заготовка подается на пресс, где легким обжимом от наружной и внутренней поверхности отделяется разделительная смесь и флюс, подогревается до температуры началаковки и подается на ковочный агрегат.

В состав агрегата входит ковочный пресс, усилием 2500 тысячи тонн, на прессе установлен четырехбойковое ковочное устройство и два манипулятора, грузоподъемностью 20 и 10 тонн. Один манипулятор удерживает специальную, сменную, водоохлаждаемую оправку. Оправка имеет небольшую длину, перекрывающую только зону деформации под бойками ковочного блока, диаметр ее определяет внутренний размер заготовки. Штанга, на которой крепится оправка, имеет размер позволяющий ковать трубы длиной до 8 метров. Второй манипулятор удерживает заготовку и передвигает ее по оправке в соответствии с необходимой последовательностью обжатий. Ковка производится с разворотом. Сначала протягивается небольшой участок с одной стороны, длиной немного большей

захватной части клещей манипулятора, чтобы не застудить клещами часть заготовки, удерживаемую в манипуляторе в первый момент.

Затем производится разворот заготовки, она заводится на оправку до обжатой зоны и протягивается в размер, установленный для этого выноса, он на 10% больше конечного, с учетом температурной усадки. Размер оправки выбирается с учетом этого. Далее оправка извлекается из поковки и производится обжим без нее. Эта операция позволяет при необходимости провести промежуточный подогрев заготовки, без угрозы перегрева структуры откованной части, также выдавить с внутренней поверхности остатки шлака и окалины, которые могут затруднить последующую механическую обработку заготовки, откалибровать наружный диаметр и уменьшить необходимый припуск до минимума. Далее поковка проходит нужную термообработку, в зависимости от технических требований к изделию. Нормализация проводится в термических печах кузнечного цеха, улучшение в газовой печи термического цеха.

В механических цехах и участках проводится проточка, при этом удаляются дефекты поверхности и вырезаются необходимые образцы для исследований. Исследования проводятся в центральной заводской лаборатории и подтверждают или не подтверждают необходимые технологические параметры материала полученной трубы. Такой режим работы был традиционным для литейного производства. Появление приборов типа iPoRTN кардинально расширяет возможности по оперативному контролю параметров изготовленного изделия и позволяет при необходимости корректировать параметры описанного технологического процесса в ходе производства. Из описания процесса и наличия в нем не только отливки, ноковки понятно, что контроль механических свойств конечного изделия должен носить развернутый характер и не может быть ограничен только отдельными образцами, вырезанными из концевых областей изделия. Появление приборов типа iPoRTN позволяет оптимальным образом выполнить целенаправленную модернизацию РМЦ1000 и путем

модернизации используемой дуговой печи расширить сортамент используемых для изготовления полых отливок и труб сталей.

При производстве труб описанным методом уменьшаются потери энергии за счет использования остаточного тепла отливки при нагреве под ковку. Потери металла сводятся к минимальному расходу на стружку при обработке и концевой обрезки поковки. При раскросе слитка (центробежной отливки) в потери уходит только небольшой угар. Три типоразмера изложниц позволяют перекрыть потребность в наружных размерах труб от 400 мм до 900мм с любым шагом типоразмеров. Внутренние размеры определяются короткими оправками, имеющими небольшую стоимость. А специфика процесса и четкий контроль температурных режимов обеспечивает необходимый уровень качества конечных изделия. Ниже приведены примеры образцов трубной заготовки из стали 16ГС, рисунок 174.



Рисунок 174 – Примеры трубных заготовок изготовленных на РМЦ1000

На предприятии имеется все необходимое оборудования для придания конечным изделиям товарного вида и приведения их к нужным габаритам и необходимому виду оконцовки, рисунок 175.



Рисунок 175 – Обработка заготовки на токарном станке

В ходе выполнения работ по ПНИЭР в соответствии с требованиями ТЗ и Планом-графиком была выполнена модернизация РМЦ-1000 в части разработки и изготовления новой дуговой печи для выплавки специальных сталей, рисунки 176 и 177.

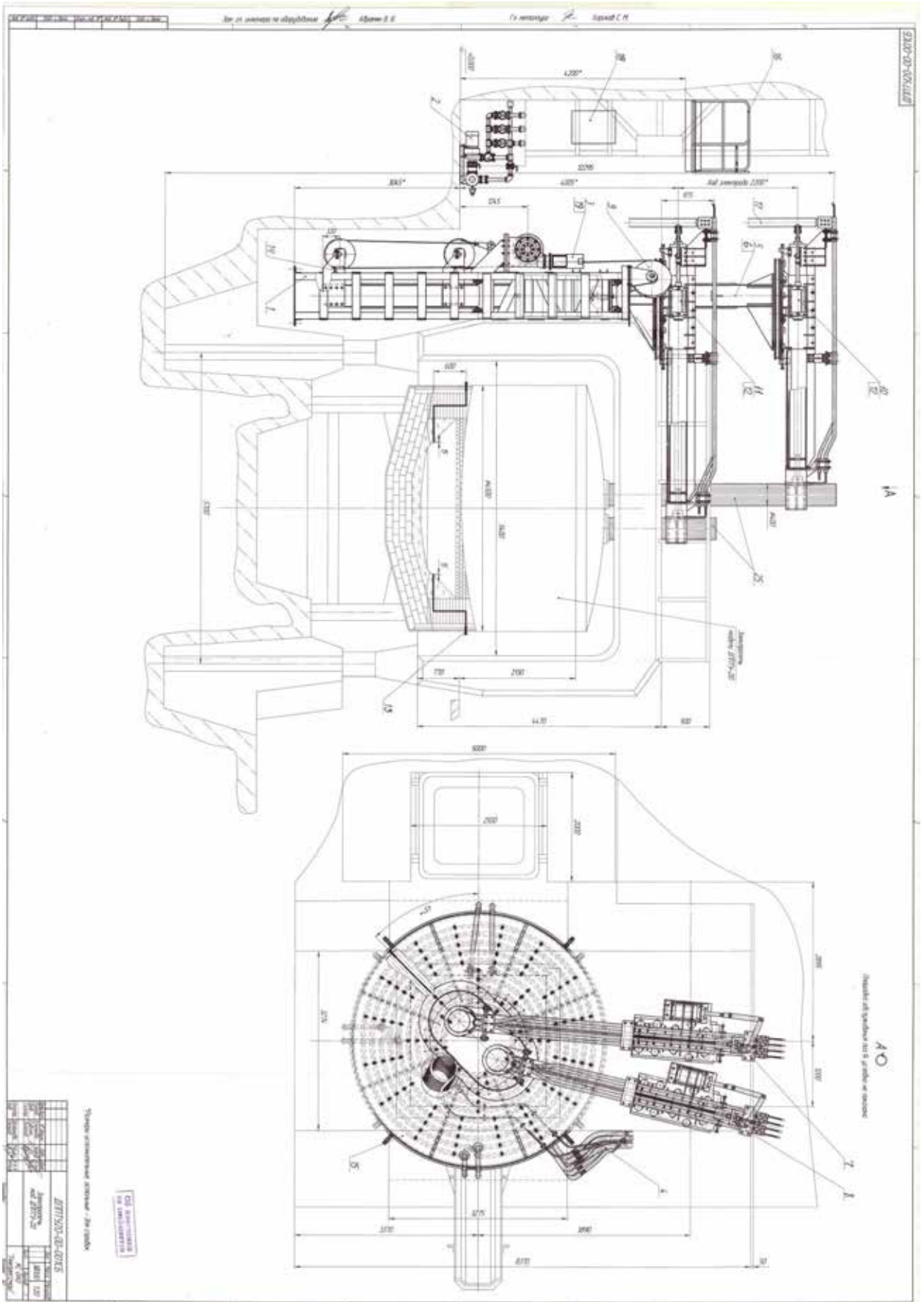


Рисунок 176 – Чертеж новой конфигурации электродов и днища модернизированной плавильной печи

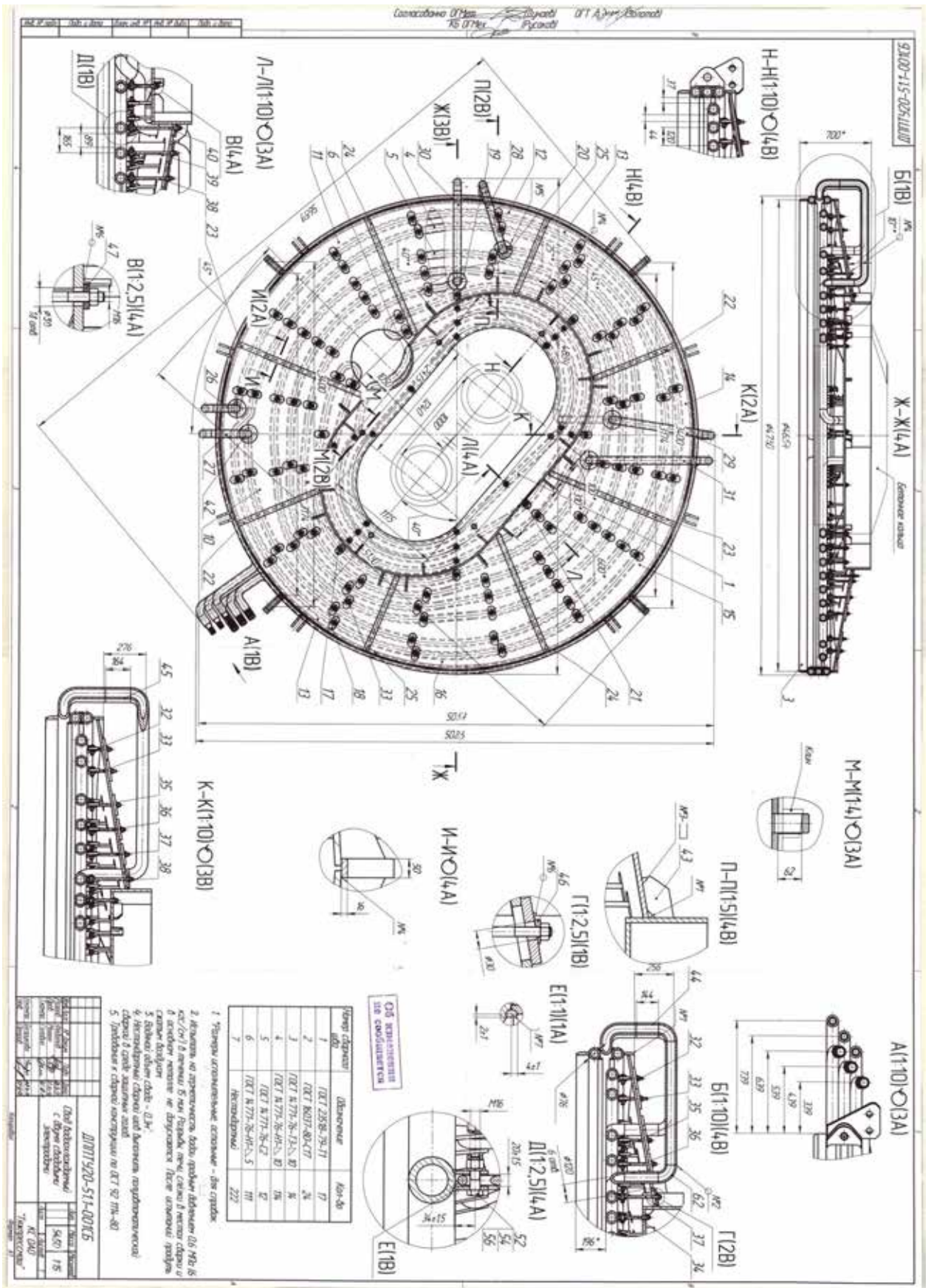


Рисунок 177 – Вид сверху на модернизированную плавильную печь

Таким образом, на ОАО «Тяжпрессмаш» совместно с АО НПО «ЦНИИТМАШ» разработана и освоена ресурсосберегающая технология производства изделий ответственного назначения для нужд атомной отрасли, энергетики, нефтехимии и общего машиностроения с использованием центробежного литья полых заготовок. Организация готова к сотрудничеству с промышленными предприятиями, а также производителями оборудования совместно с Фондом Развития Промышленности. В рамках реализации государственной политики импортозамещения и развития отечественной промышленности совместно с ГК «Ростех» была учреждена «Национальная лизинговая компания по развитию промышленности». Основной задачей компании является системная поддержка российских промышленных предприятий через механизм лизинга.

Новая технология по изготовлению толстостенных труб, освоенная на ОАО «Тяжпрессмаш» имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной из стационарно литых слитков: – получение полых заготовок без применения стержней и металлических вставок; – высокое качество отливок и поковок; – возможность получения заготовок с заданными механическими свойствами и необходимым химическим составом; – низкая себестоимость при изготовлении штучных заготовок; – использование трудно деформируемых сплавов; – получение многослойных заготовок.

Разработка и налаживание серийного производства приборов для оперативного контроля механических свойств изготавливаемой продукции прямо в условиях литейного производства с использованием технологии заложенной в iPoRTN должно гарантировать заданные свойства изделий без разрушающего испытания образцов вырезанных из готовых изделий.

По проекту, разработанному совместно с АО НПО «ЦНИИТМАШ» изготовлена машина центробежного литья РМЦ-1000, которая позволяет получать заготовку двойного назначения, как для использования в литых изделиях, так и для дальнейшего изготовления поковок толстостенных труб и



колец, требуемых размеров и конфигурации. Машина РМЦ-1000 оснащена изложницей с приводными опорными роликами и устройством для нанесения теплоизоляционного покрытия на внутреннюю поверхность вращаемой изложницы. Тип машины – центробежная с горизонтальной осью вращения. Габаритные размеры: 12400×6700 мм, высота 2400 мм. Масса машины 60,5 т. Технологическая база ОАО «Тяжпрессмаш» позволяет обеспечить производство отливок из сталей широкого спектра от углеродистых до высоколегированных. Выплавка стали для РМЦ-1000 производится на сталеплавильных печах ДСВ-Н1, ДППТУ-20. Заливка металла производится из ковшей емкостью 10 т в зависимости от размера получаемой отливки. Назначение отливок, изготавливаемых на РМЦ1000 – получение широкой гаммы полых заготовок различных размеров для изготовления изделий ответственного назначения, используемых в атомной, тепловой, нефтехимической и других отраслях промышленности.

Машина РМЦ-1000 позволяет изготавливать крупногабаритные заготовки с наружным диаметром от 700 до 1000 мм и толщиной стенки до 250 мм, длиной до 3000 мм, массой заготовки до 6000 кг с двойным назначением, как для использования в качестве литых изделий, так и для последующейковки. При ковке заготовок на гидравлическом прессе усилием 2500 т в 4-х бойковом ковочном устройстве на оправке производится изготовление толстостенных труб с мелкозернистой структурой, минимальным припуском под дальнейшую механическую обработку и с повышенными размерными характеристиками (после вытяжки, длиной 6–8 м).

Для изготовления колец, методом раскатки, используются центробежнолитые толстостенные заготовки после разрезки на ленточнопильном станке или на газорезательной машине. Готовую поковку получают за одну технологическую операцию раскатки на оправке, минуя многочисленные и трудоемкие стадии получения штучной заготовки из кузнечного слитка, связанные с протяжкой, рубкой на мерные части,

промежуточным подогревом, осадкой, прошивкой отверстия, правкой и вторым промежуточным подогревом и с последующей ковкой до окончательных размеров. Качество металла толстостенных заготовок отличается высокой плотностью и отсутствием газоусадочной пористости и ликвационных дефектов, благодаря разработанному процессу направленного и последовательного затвердевания металла от внешней поверхности к внутренней, защищаемыми от охлаждения специальными флюсами.

Физико-механические свойства металла центробежнолитых заготовок отличаются изотропностью и удовлетворяют высоким требованиям технических условий на изделия, эксплуатируемые в энергетике, металлургии и машиностроении. Сквозной контроль физико-механических свойств заготовок планируется осуществлять с использованием приборов iPoRTH. Появление такой возможности оперативного контроля стимулировало работы по модернизацию плавильной печи и позволит приступить к освоению производства новых видов продукции, нужных атомной отрасли.

Новая центробежная технология позволяет сократить расход металла на 25–30 % по сравнению с традиционной технологией изготовления колец из слитка, в связи со значительными трудозатратами, характерными для этой технологии при удалении прибыльной и донной части, а также последующей прошивки. Настоящая работа проведена в соответствии с решением Наблюдательного совета «Агенство стратегических инициатив по продвижению новых проектов» под председательством В.В.Путина согласно проекту: «Создание технологического цикла по производству изделий с применением технологии центробежного литья».

### **Результаты и выводы раздела**

Таким образом, в ходе выполнения работ в рамках ПНИЭР созданы все необходимые условия для успешного освоения производства широкого круга новых изделий с гарантированными механическими свойствами,

благодаря оперативному сквозному контролю прочностных и пластических свойств используемого металла, на всех стадиях производства.

Комплект КД на модернизацию стенда РМЦ-1000, акт изготовления оснастки, акт модернизации стенда РМЦ-1000 приведены в Приложении Л.

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.17 ПГ и п.3.17 ТЗ.

## 18 Приобретение оборудования / комплектующих / материалов, необходимых для выполнения ПНИЭР

В рамках работ по 1 этапу ПНИЭР индустриальным партнером ОАО «Тяжпрессмаш» было приобретено оборудование, материалы и комплектующие, необходимые для выполнения работы, на общую сумму 33 836 923руб.

В части оборудования был приобретен твердомер NEXUS 3200 на сумму 1,63 млн. руб.

Твердомер NEXUS 3200 BIOS является твердомером премиум класса, с автоматическим режимом измерения твердости материалов по методу Бринелля. Твердомер оснащён автоматическим цифровым микроскопом для автоматического измерения отпечатка с оптикой немецкого качества. Прибор поддерживает преобразование результатов в другие шкалы твердости и онлайн статистику одним нажатием кнопки без использования таблиц. Имеется возможность подключения для вывода данных через внешний интерфейс RS-232.

Прибор оснащен ЖК-дисплеем, отображающим значения измерений, статистики и настройки прибора. Предусмотрена защита индентора.

- Принцип приложения нагрузки - нагрузочная ячейка с обратной связью
- Вибрации и положение твердомера при измерении не оказывают влияния на результат испытания
- Диапазон нагрузок: от 30 кгс до 3000 кгс
- Нагрузки по Бринеллю: 30 кгс, 31.25 кгс, 62.5 кгс, 125 кгс, 187.5 кгс, 250 кгс, 750 кгс, 1000 кгс, 1500 кгс, 3000 кгс
- Перевод в другие шкалы твердости
- Выносной цифровой микроскоп для автоматического измерения отпечатка.

- Размеры рабочего пространства 220 x 220 мм (390 x 220 модель XLM)
- Моторизованный подъем с функцией распознавания образца (модель XLM)
- Функция защиты индентора
- Преобразование результатов без использования таблиц, онлайн статистика нажатием одной кнопки
- Высокая воспроизводимость и повторяемость результатов
- Соответствует или превосходит все существующие стандарты (ASTM, DIN, ISO, EN, JIS)
- Автоматическое проведение испытаний (нагружение / выдержка / снятие нагрузки)

Трубы, металлопрокат на сумму 9,3 млн. руб.

Металлопрокат предназначен для изготовления элементов конструкции печи в том числе оснасток, желобов, стержней, плунжеров. Трубы предназначены для обеспечения отвода шлаков, охлаждения изложниц

Огнеупорные изделия, бетон кералит на сумму 3,62 млн. руб.

Огнеупорные изделия предназначены для изготовления покрытий изложниц и форм, используемых для отливки металла.

Инструмент (ленточные пилы, резьбонарезные пластины, твердосплавные пластины, фрезы, круги шлифовальные) на сумму 0,83 млн. руб.

Инструменты предназначены для проведения подготовительных и вспомогательных работ, подготовки поверхностей материалов.

Расходные материалы и компоненты (электроды графитированные, флюс сварочный) на сумму 5,56 млн. руб.

Материалы предназначены для обеспечения работы установки, в частности графитированные электроды подлежат регулярной замене являются основным элементом конструкции, необходимым для подачи тока

и разогрева сплава. Флюс сварочный используется для обеспечения формирования поверхности шва, изоляции свариваемых деталей от шлаков.

Комплектующие (система равнения хода, мотор-редуктор, пробоотборник, тяговая батарея) на сумму 4,09 млн. руб.

Комплектующие предназначены для обеспечения работы системы позиционирования элементов установки, вращения изложницы, поворота тигеля.

Шихтовые материалы (ферросплавы, чугун передельный, науглероживатель) на сумму 8,73 млн. руб.

Шихтовые материалы используются в качестве исходного сырья для изготовления отливок, науглероживатели используют в качестве компонента обеспечивающим ввод углерода в расплав, что обеспечивает необходимую прочность изготавливаемых стальных отливок.

#### **Результаты и выводы раздела**

Полученные результаты соответствуют задачам п. 1.18 ПГ и п.3.61 ТЗ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ, выполненных на первом этапе ПНИЭР, посвященном обзору проблемы, разработке, изготовлению и испытанию элементов экспериментального образца iPoRTH, был проведен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, а также патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96. Исходя из имеющихся литературных данных и технической информации была проведена разработка вариантов возможных технических решений задачи создания экспериментального образца iPoRTH, а также произведен выбор наиболее перспективного и технологичного технического решения для реализации экспериментального образца iPoRTH, в частности были приняты решения о использовании емкостного дифференциального преобразователя для измерения перемещения, о применении линейного транслятора и электромагнитного привода в качестве актюаторов индентационного модуля и модуля оперативного контроля; а также об изготовлении силочувствительного индентационного модуля в виде монолитной конструкции. Для предложенного решения было проведено аналитическое и численное моделирование, показавшее работоспособность конструкции при индентировании с нагрузками, определенными в Техническом задании. Для макета индентационного измерительного модуля была разработана ЭКД, макет был изготовлен. Были разработаны Программы и методики исследовательских испытаний индентационного измерительного модуля, согласно которым были проведены испытания. Кроме того, были проведены экспериментальные исследования с целью выработки рекомендаций по набору измеряемых характеристик в зависимости от способов обработки наиболее распространенных конструкционных материалов, в рамках которых была показана возможность коррекции измеряемых значений твердости при измерениях шероховатых образцов, при условии определения параметров автокорреляционной функции поверхности. Были проведены

экспериментальные исследования с целью обоснования и выбора материалов для изготовления элементов конструкции экспериментального образца iPoRTH, в качестве держателя сферического индентора было предложено использовать твердосплавную опору со сферической лункой. Была проведена компоновка основных радиоэлектронных узлов и проведено моделирование электронной схемы управления измерительным модулем, вычислительного блока обработки данных, схемы электропитания и модуля беспроводной цифровой связи.

Индустриальным партнером было разработано ЭКД и изготовлен макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH. Для данного макета были разработаны программы и методики и проведены исследовательские испытания. Был модернизирован стенд РМЦ – 1000, приобретены оборудование, комплектующие и материалы, необходимые для выполнения ПНИЭР.

Задачи, поставленные на отчетном периоде, решены в полном объеме в соответствии с Техническим заданием и Планом-графиком, все работы выполнены на должном уровне.

Информация о ходе выполнения ПНИЭР и основных результатах, полученных при выполнении проекта, размещена в Интернет на веб-сайте ФГБНУ ТИСНУМ по адресу <http://www.tisncm/fcp.html>.



По результатам выполнения работ первого этапа были достигнуты следующие индикаторы и показатели:

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Число публикаций по результатам проекта в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus или в базе данных "Сеть науки" (WEB of Science), обеспечивающем продвижение результатов проекта и расширение круга заинтересованных в использовании результатов организаций, не менее	единиц	0
2	Число результатов интеллектуальной деятельности и средств индивидуализации, планируемых к получению при выполнении ПНИЭР и обеспечивающих возможность получателю субсидии и (или) индустриальному партнёру исключительного положения на рынках продукции (товаров, услуг) и (или) технологий, в том числе рынках Национальной технологической инициативы	единиц	0
3	Число патентных заявок, поданных по результатам исследований и разработок, не менее	единиц	0
4	Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей - участников проекта, не менее	процентов	43,8
5	Объем привлеченных внебюджетных средств	Млн. руб.	52,99
6	Средний возраст исследователей – участников проекта, не более	лет	41,9
7	Количество мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений науки, в которых приняла участие и представила результаты проекта организация - исполнитель проекта, не менее результатов проекта организация - исполнитель проекта, не менее	единиц	1
8	Ожидаемая аудитория мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений науки, на которых представлены результаты проекта, не менее	человек	2260
9	Ожидаемая интернет-аудитория мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений науки, на которых представлены результаты проекта, не менее	пользователей	1130
10	Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных по результатам исследований и разработок	единиц	0
11	Количество использованных при проведении исследований и разработок в рамках проекта уникальных научных установок и центров коллективного пользования научным оборудованием, научное оборудование которых использовалось при проведении исследований и разработок в рамках проекта	единиц	1
12	Количество используемых при проведении исследований и разработок объектов зарубежной инфраструктуры сектора исследований и разработок	единиц	0

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fischer-Cripps A.C. Nanoindentation. New York: Springer-Verlag, 2011.
2. ISO 14577 - 1 Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method.
3. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) ГСИ. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.
4. Maslenikov I.I. et al. Mapping of mechanical properties of nanostructured materials using a piezoresonance probe // Instruments Exp. Tech. 2015. Vol. 58, № 3. P. 438–443.
5. Feng C. et al. A load-based multiple-partial unloading micro-indentation technique for mechanical property evaluation // Exp. Mech. 2010. Vol. 50, № 6. P. 737–743.
6. Усеинов А.С. et al. Получение томограммы механических свойств методами наноиндентирования // Наноиндустрия. 2014. № 1. P. 34–39.
7. Sharma V., Doerr N., Aswath P.B. Chemical–mechanical properties of tribofilms and their relationship to ionic liquid chemistry // RSC Adv. 2016. Vol. 6, № 27. P. 22341–22356.
8. Li X., Bhushan B. A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications // Mater. Charact. 2002. Vol. 48, № 1. P. 11–36.
9. <https://www.bruker.com/nc/products/surface-and-dimensional-analysis/nanomechanical-test-instruments/nanomechanical-upgrade-options/nanodma-iii.html> [Electronic resource].
10. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-4183EN.pdf> [Electronic resource].
11. Tsai P.C., Jeng Y.R. Effects of nanotube size and roof-layer coating on viscoelastic properties of hybrid diamond-like carbon and carbon nanotube composites // Carbon N. Y. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 86. P. 163–173.

12. Toledano M. et al. Mechanical loading influences the viscoelastic performance of the resin-cariou dentin complex // *Biointerphases*. 2017. Vol. 12, № 2. P. 21001.
13. TECHNICAL REPORT ISO / TR 29381 Metallic materials — Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test — Indentation tensile properties. 2008. Vol. 2008.
14. Ki-Han Kim, Georges Chahine, Jean-Pierre Franc A.K. *Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction*. Springer, 2014. 399 p.
15. Tabor D. A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness // *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1948. Vol. 192, № 1029. P. 247–274.
16. Huang Q.Q. et al. Spherical indentation with multiple partial unloading for assessing the mechanical properties of ZrB<sub>2</sub>-SiC composites // *Ceram. Int.* 2015. Vol. 41, № 9. P. 12349–12354.
17. Field J.S., Swain M.V. Determining the mechanical properties of small volumes of material from submicrometer spherical indentations // *J. Mater. Res.* 1995. Vol. 10. P. 101–112.
18. Kot M. et al. Load-bearing capacity of coating – substrate systems obtained from spherical indentation tests // *Mater. Des.* Elsevier Ltd, 2013. Vol. 46. P. 751–757.
19. Lee J.H., Kim T., Lee H. A study on robust indentation techniques to evaluate elastic-plastic properties of metals // *Int. J. Solids Struct.* Elsevier Ltd, 2010. Vol. 47, № 5. P. 647–664.
20. Lee H., Haeng Lee J., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // *J. Mech. Phys. Solids*. 2005. Vol. 53, № 9. P. 2037–2069.
21. Haggag F. et al. Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials // *Appl. Autom. Technol. to Fatigue Fract. Test.* 1990. № March 2015. P. 188-188–21.

22. Haggag F.M., Nanstad R.K., Braski D.N. Structural integrity evaluation based on an innovative field indentation microprobe // Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP. 1989. Vol. 170, № New York, NY, United States. P. 101–107.
23. Haggag. US Patent 4.852.397. 1989.
24. Khandelwal H.K. Evaluation of Mechanical Behavior of Nuclear Component Materials Using Automated Ball Indentation Approach. Thapar University, Patiala, 2011. 85 p.
25. Sharma K. et al. Numerical simulation with finite element and artificial neural network of ball indentation for mechanical property estimation // Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci. 2011. Vol. 36, № 2. P. 181–192.
26. Štefan J. et al. Comparison of Conventional Mechanical Testing with Innovative Techniques for Determination of Mechanical Properties of Nuclear Power Plant Components Materials // Appl. Mech. Mater. 2015. Vol. 784. P. 452–459.
27. Kopriva R., Eliasova I., Kytka M. Implementation of small punch testing and automated ball indentation in the process of irradiated npp materials degradation evaluation // Proc. 2016 24th Int. Conf. Nucl. Eng.
28. Francis H.A. Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation // J. Eng. Mater. Technol. 1976. Vol. 98, № 3. P. 272–281.
29. Горбатенко В.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. Неустойчивость Пластического Течения: Полосы Чернова--Людерса И Эффект Портевена-Ле Шателье // Журнал Технической Физики. 2017. Vol. 87, № 3. P. 372.
30. Haggag F.M., Lucas G.E. Determination of Luders Strains and Flow Properties in Steels from Hardness / Microhardness Tests // Metall. Trans. A. 1983. Vol. 14, № August. P. 1607–1613.
31. Morrison W.B. Second International Conference on the Strength of Metals and Alloys // Second International Conference on the Strength of Metals and Alloys. American Society for Metals, Metals Park, 1970. P. 879.

32. A. George R., Dinda S., S. Kasper A. Estimating yield strength from hardness data // *Met Prog.* 1976. Vol. 109. P. 30–33.
33. Haggag. ATC corporation “Standard Test Methods for Automated Ball Indentation (ABI) Testing of Metallic Samples and Structures to Determine Tensile Properties and Stress-Strain Curves.” 2009.
34. [https://www.astm.org/SNEWS/FEBRUARY\\_2004/ball\\_feb04.html](https://www.astm.org/SNEWS/FEBRUARY_2004/ball_feb04.html) [Electronic resource].
35. Hill R., Storakers B., Zdunek A.B. A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test // *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1989. Vol. 423, № 1865. P. 301–330.
36. Ahn J.-H., Kwon D. Derivation of plastic stress–strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect // *J. Mater. Res.* 2001. Vol. 16. P. 3170–3178.
37. Kinsey B.L., Wu X. Tailor welded blanks for advanced manufacturing // *Tailor Welded Blanks for Advanced Manufacturing.* 2011. 1-208 p.
38. Kim E.-G., Kwon D. Il, Ahn J.-H. Korean Patent (app. no. 1020010001770). Determination of strain-hardening exponent and strength coefficient using continuous indentation test (in Korean). Korea, 2001.
39. Taljat B., Zacharia T., Pharr G.M. Pile-Up Behavior of Spherical Indentations in Engineering Materials // *Mater. Res. Soc. proceedings.* 1998. Vol. 522. P. 33–38.
40. Kim S.H. et al. Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials - A FEM study // *Mater. Sci. Eng. A.* 2006. Vol. 415, № 1–2. P. 59–65.
41. Kim E.-G., Kim K.H. Korean Patent (app. no. 1020050093986). Determination of fictitious strain-hardening exponent, strength coefficient, yield strength and tensile strength using continuous indentation test. 2005.
42. Cheng Y.T., Cheng C.M. Can stress-strain relationships be obtained from indentation curves using conical and pyramidal indenters? // *J. Mater. Res.* 1999. Vol. 14, № 9. P. 3493–3496.

43. Dao M. et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation // *Acta Mater.* 2001. Vol. 49, № 19. P. 3899–3918.
44. Ball S.N. et al. International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2012) // *J. Phys. Conf. Ser.* 2012. Vol. 365. P. 11001.
45. Haggag. In-Situ Measurement of Pipeline Mechanical Properties Using Stress-Strain Microprobe – Validation of Data for Increased Confidence & Accuracy. 2007.
46. <http://www.frontiers.com>.
47. <http://www.frontiers.com/products/category/1144> [Electronic resource].
48. Kwon D. Il, Chol Y., Lee Y. US patent 6718820B2. Apparatus for indentation test and method for measuring mechanical properties using it. 2004.
49. <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/oles/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSF-AA-10jul12.pdf> [Electronic resource].
50. ISO 25178-6:2010 Geometrical product specifications (GPS) -- Surface texture: Areal -- Part 6: Classification of methods for measuring surface texture.
51. Leach R. *Optical Measurement of Surface Topography*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. Vol. 53, № 9.
52. Lehmann P., Tereschenko S., Xie W. Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry // *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* IOP Publishing, 2016. Vol. 4, № 2. P. 24004.
53. de Groot P. The Meaning and Measure of Vertical Resolution in Optical Surface Topography Measurement // *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7, № 1. P. 4.
54. De Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography // *Adv. Opt. Photonics*. 2015. № 7. P. 1–65.
55. Schmit J., Chen D. Greater Measurement Detail with High-Definition Vertical Scanning Interferometry.

- [https://www.bruker.com/fileadmin/user\\_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/3D-OpticalMicroscopy/ApplicationNotes/AN541-Greater\\_Measurement\\_Detail\\_with\\_High-Definition\\_Ve.pdf](https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/3D-OpticalMicroscopy/ApplicationNotes/AN541-Greater_Measurement_Detail_with_High-Definition_Ve.pdf).
56. <https://www.zygo.com/?/met/interferometers/qpsi/> [Electronic resource].
  57. Leach R. et al. Guide to the Measurement of Smooth Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry // National Physical Laboratory. 2008. № 108. 56 p.
  58. Advantages of ZDot Technology vs WLI.  
[http://www.nanoscience.com/files/4714/3144/5335/NSI\\_ZDot\\_vs\\_WLI\\_0415.pdf](http://www.nanoscience.com/files/4714/3144/5335/NSI_ZDot_vs_WLI_0415.pdf) [Electronic resource].
  59. [https://www.bruker.com/fileadmin/user\\_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/3D-OpticalMicroscopy/Webinars/An\\_introduction\\_to\\_non-contact\\_surface\\_metrology-Jun\\_2013.pdf](https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/3D-OpticalMicroscopy/Webinars/An_introduction_to_non-contact_surface_metrology-Jun_2013.pdf) [Electronic resource].
  60. Vorburger T. V, Song J., Petraco N. Topography measurements and applications in ballistics and tool mark // Surf. Topogr. Metrol. Prop. IOP Publishing, 2016. Vol. 4, № 1. P. 1–52.
  61. <http://www.sensofar.com/metrology/slynx/specifications/> [Electronic resource].
  62. Quagliotti D. et al. Performance verification of focus variation and confocal microscopes measuring ultra-fine tilted surfaces // Proc. euspen's 16th Int. Conf. Exhib. 2016. P.169–170.
  63. <http://www.confovis.com/products/confovis-duo-vario.html> [Electronic resource].
  64. <http://www.sensofar.com/metrology/technology/> [Electronic resource].
  65. Dörband B. Handbook of Optical Systems, Metrology of Optical Components and Systems. 2012. Vol. 5. 489-558 p.
  66. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Adv. Opt. Photonics. 2012. Vol. 4, № 4. P. 441.
  67. <https://www.acuitylaser.com/measurement-principles> [Electronic resource].

68. Akmal J.S. Investigation of Optical Distance Applications in Tool Industry Sensors for Application in Tool Industry. University of Applied Sciences Schmalkalden. 2013. 89 p.
69. <http://ecatalog.stil-sensors.com/STIL-catalog.pdf> [Electronic resource].
70. Zarubiieva I. Asbestos Imaging and Detection with Differential Interference Contrast Microscopy // Aerosol Air Qual. Res. 2013. Vol. 13. P. 1145–1150.
71. <https://www.microscopyu.com/techniques/dic/reflected-light-dic-microscopy> [Electronic resource].
72. <https://www.qualitymag.com/articles/93544-a-closer-look-at-3d-imaging> [Electronic resource].
73. <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/indexmag.html?http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artjun10/sw-gallery4.html> [Electronic resource].
74. <https://gomeasure3d.com/mikrocad/> [Electronic resource].
75. <https://www.h2wtech.com/article/highest-force-moving-magnet-voice-coil-actuator>.
76. <https://www.h2wtech.com/category/voice-coil-actuators#specifications1>.
77. <http://www.hsmagnets.com/blog/magnets-measured-graded-strength-quality-etc/>.
78. [http://nanoscantech.ru/raw/files/art\\_files/piezopositioningen.pdf](http://nanoscantech.ru/raw/files/art_files/piezopositioningen.pdf).
79. <https://www.newport.com/p/NPX200SGV6>.
80. [http://www.highexpert.ru/content/steels\\_and\\_alloys/alloys\\_al\\_mg\\_ti\\_cu\\_ni.html](http://www.highexpert.ru/content/steels_and_alloys/alloys_al_mg_ti_cu_ni.html).
81. <http://www.stanleyengineeredfastening.com/brands/spiralock/information-center/torque-calculator>.
82. <http://www.orientalmotor.com/stepper-motors/closed-loop-stepper-motors-ar-series.html>.
83. ISO/FDIS 14577-1:2002; Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.



84. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-4172EN.pdf>.
85. <https://www.hysitron.com/resources-support/education-training/nanoindentation>.
86. [http://www.lihyuan.com.tw/attachment/product\\_tw\\_attach\\_102.pdf](http://www.lihyuan.com.tw/attachment/product_tw_attach_102.pdf).
87. <https://www.metrolog.net/lvdt.php?lang=en>.
88. Fleming A., Leang K. Design, Modeling and Control of Nanopositioning Systems. 2014.
89. <http://nanovea.com/wp-content/themes/wp-nanovea/brochures/mechanicaltesters.pdf>.
90. <http://www.interfaceforce.com/index.php?SMT-Overload-Protected-S-Type-Load-Cell&mod=product&show=31>.
91. Vettiger P. et al. The “Millipede” - Nanotechnology Entering Data Storage // IEEE Trans. Nanotechnol. 2002. Vol. 1, № 1. P. 39–55.
92. Lantz M.A. et al. A micromechanical thermal displacement sensor with nanometre resolution // Nanotechnology. 2005. Vol. 16, № 8. P. 1089–1094.
93. [https://www.engineersedge.com/beam\\_bending/beam\\_bending19.htm](https://www.engineersedge.com/beam_bending/beam_bending19.htm) [Electronic resource].
94. Oberg E. Machinery’s Handbook Guide 28th Edition. 2008. 2704 p.
95. [http://www.tribology-abc.com/calculators/e3\\_6a.htm](http://www.tribology-abc.com/calculators/e3_6a.htm) [Electronic resource].
96. [http://www.tribology-abc.com/calculators/e3\\_6f.htm](http://www.tribology-abc.com/calculators/e3_6f.htm) [Electronic resource].
97. Kim J.-Y. et al. Surface roughness effect in instrumented indentation: A simple contact depth model and its verification // J. Mater. Res. 2006. Vol. 21, № 12. P. 2975–2978.
98. Mack C.A. Generating random rough edges, surfaces, and volumes // Appl. Opt. 2013. Vol. 52, № 7. P. 1472–1480.
99. Gong Y. et al. Surface Roughness Measurements Using Power Spectrum Density Analysis with Enhanced Spatial Correlation Length // J. Phys. Chem. C. 2016. Vol. 120, № 39. P. 22358–22364.
100. Johnson K. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. 453 p.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов»  
(ФГБНУ ТИСНУМ)

УДК 531.7; 620.17.08  
ВГК ОКП 39 7290 7  
№ Госрегистрации 117101340071-8  
Инв. № 227

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБНУ ТИСНУМ,  
д.ф.-м.н.


В.Д. Бланк  
«29» декабря 2017 г.  
М.П.

ОТЧЕТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

«Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях»  
по теме: «Обзор проблемы, разработка, изготовление и испытания элементов экспериментального образца iPoRTH»  
(промежуточный)  
Этап первый

Соглашение о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г.  
№ 14.577.21.0274

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»  
Приоритетное направление «Индустрия наносистем»

Часть 2 ПРИЛОЖЕНИЯ

Руководитель работ,  
Заведующий отделом исследования  
физико-механических свойств  
ФГБНУ ТИСНУМ, к.ф.-м.н.

  
/ А.С. Усеинов

г. Москва, г. Троицк 2017 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов»  
(ФГБНУ ТИСНУМ)

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий отделом  
ФГБНУ ТИСНУМ  
кандидат физ.-мат. наук

  
А.С. Усеинов  
«15» ноября 2017 г.  
М.П. 

### ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

по теме:

«Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях»

Соглашение о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г.

№14.577.21.0274

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»

Приоритетное направление «Индустрия наносистем»

г. Москва, г. Троицк, 2017 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Вед. науч. сотр.,  
д.ф.-м.н.

  
подпись, дата

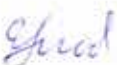
В.Н. Решетов  
(разделы 1-3,  
заключение,  
приложения АА-АГ)

Науч. сотр.,  
к.ф.-м.н.

  
подпись, дата

И.И. Маслеников  
(разделы 1-3,  
приложения АА-АГ)

Стажер-иссл.

  
подпись, дата

Е.В. Гладких (разделы  
1-3)

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	259
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ .....	262
ОБЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	263
1. Анализ технического уровня разработок в исследуемой области техники .....	265
2. Анализ тенденций и прогноз развития исследуемой области техники.....	266
3. Анализ патентоспособности портативного роботизированного твердомера .....	270
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	272
ПРИЛОЖЕНИЕ АА. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	273
ПРИЛОЖЕНИЕ АБ. РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА.....	275
ПРИЛОЖЕНИЕ АВ. ОТЧЕТ О ПОИСКЕ .....	277
ПРИЛОЖЕНИЕ АГ. ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПАТЕНТОСПОСОБНОСТЬ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	283

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ,  
СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ

МПК (МКИ) – международная патентная классификация изобретений  
(международная классификация изобретений)

ФИПС – Федеральный институт промышленной собственности

НКИ – национальная классификация изобретений

ГС – гармонизированная система (гармонизированная товарная  
номенклатура)

СМТК – стандартная международная торговая классификация ООН

БТН – Брюссельская таможенная номенклатура

УДК – универсальная десятичная классификация

ПНИЭР - прикладные научные исследования и экспериментальные  
разработки

РИД – результаты интеллектуальной деятельности;

ISO International Organization for Standardization

RU – Российская Федерация

US – Соединенные Штаты Америки

KR – Корея

ESPACENET – База данных Европейского Патентного офиса

## ОБЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Патентные исследования проведены в соответствии с пунктом 3.2 Технического задания (приложение №1 к Соглашению от 26 сентября 2017 г. № 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии).

Дата начала работ: 2 октября 2017 г.; дата окончания работ: 15 ноября 2017 г.

Проект, в рамках которого проведены патентные исследования, имеет целью обеспечение возможности проведения измерений рельефа поверхности и механических свойств при помощи портативного автономного прибора, позволяющего проводить испытания на крупногабаритных элементах узлов и агрегатов, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях, а также функциональных металлических и композиционных гетерофазных конструкционных материалов нового поколения и деталей сложной формы, в том числе, полученных с использованием аддитивных технологий.

Объектом патентных исследований являются портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств технических изделий: приборы, позволяющие производить исследования методом инструментального индентирования в условиях промышленного производства, в том числе на габаритных заготовках, трубопроводах, элементах конструкции атомных и тепловых электростанций.

Целью патентных исследований является выяснение технического уровня разработок в области приборов, осуществляющих оперативный контроль механических свойств поверхностей изделий в отраслях машиностроения и металлообработки, а также определение патентоспособности портативного роботизированного твердомера, использующего принципы инструментального индентирования.

Задачами патентных исследований являются:

- исследование технического уровня разработок в области создания и использования устройств, проводящих измерения механических свойств и рельефа поверхности в условиях промышленного производства;

- исследование тенденций развития приборов, измеряющих механические свойства поверхности при сквозном контроле как готовой продукции, так и элементов крупногабаритных узлов и агрегатов;

- исследование патентоспособности портативного роботизированного твердомера.

Для достижения цели патентных исследований патентно-информационный поиск был выполнен на основе материалов, опубликованных в базах данных Google Patent, ESPACENET и ФИПС. Также использовалась информация, представленная на сайтах производителей: Frontics (Корея), ABI Services (США). Глубина патентного поиска: 1988-2017 год. Устройства относятся к рубрикам Международной патентной классификации G01N (G01N 3/00, G01N 3/08, G01N 3/14, G01N 3/30, G01N 3/40, G01N 3/42, G01N 3/48, G01N 19/04, G01N 21/88), G01B (G01B 11/30, G01B 17/02), G01D (G01D 21/00, G01D 21/02), G06F 17/11, F16B (F16B 2/00, F16B 2/08, F16B 2/10), C25F 3/16, H02N 15/00.

Перечисленные выше производители являются лидерами в области определения механических свойств образцов в промышленных условиях, используемые ими технологические решения определяют современный уровень развития портативных твердомеров. Таким образом, информация об использованных данными производителями технологических решениях для создания приборов является достаточной для достижения необходимых результатов патентных исследований.



## 1. Анализ технического уровня разработок в исследуемой области техники

Для выявления технических тенденций развития объекта исследований были проанализированы отобранные описания к патентам и заявкам стран, производящих соответствующие устройства (США, Корея) за период с 1988 по 2017 гг.

Существует множество решений, позволяющих осуществлять измерение твердости, модуля упругости, предела текучести, коэффициента и показателя деформационного упрочнения. Основные принципы работы твердомеров являются известными, однако именно их конкретная реализация и конструктивные особенности, обеспечивающие их применение, являются патентуемыми: в частности, патентную способность определяют специфические конструктивные решения, позволяющие измерять механические свойства и рельеф поверхностей. Основным элементом разрабатываемого портативного роботизированного твердомера является индентационный модуль, предполагающий проведение комплексной диагностики механических характеристик материалов как через измерение диаграммы напряжение – пластическая деформация, так и через измерение индентационной твердости с помощью заостренных инденторов. Используемые в процессе создания данной конструкции решения обеспечивают возможность ее патентования.

## 2. Анализ тенденций и прогноз развития исследуемой области техники

Одной из разновидностей серийно выпускаемых твердомеров, являющихся универсальными приборами, предназначенными для осуществления измерений в широком диапазоне глубин индентирования и значений твердости и модуля упругости исследуемого материала, являются портативные приборы, работающие по методу инструментального индентирования.

Не смотря на то, что уже существует ряд технических решений для реализации портативного твердомера, конкретные технические подходы, кинематические и электрические схемы и их комбинации, построенные с учетом требований по точности и соответствующие условиям эксплуатации разрабатываемого прибора, имеют свои важные детали. Разрабатываемые конструкция, радиоэлектронное обеспечение и система управления измерениями позволят приспособить его к использованию как в составе роботизированных производственных линий, так и в условиях полевых измерений и работы на реальных промышленных объектах, включая трубопроводы, агрегаты ТЭЦ и АЭС.

В современных приборах используются различные схемы нагружения (электромагнитная, пьезокерамическая, пружинная и др.) и системы датчиков силы и перемещения (емкостные, электромагнитные, оптические, интерферометрические и др.). Интерес данного анализа представляют приборы с возможностью автономного функционирования, устанавливаемые на произвольную систему позиционирования, обеспечивающую подвод измерительного индентора к исследуемой поверхности.

Первым патентом, в котором было описано устройство неразрушающего контроля, аналогичное разрабатываемому прибору, был патент US 4,852,397. Описанный в нем прибор позволяет определять свойства текучести образца (путем снятия кривой напряжение-деформация), а также вязкость разрушения при контролируемом значении деформации.

Остаточные напряжения (их присутствие и ориентация), размер трещин и навалов, образующихся вокруг места индентирования, толщина покрытий измеряются при помощи ультразвукового преобразователя. Однако, такая важная характеристика, как твердость не измеряется при помощи описанного в патенте устройства.

Конструкция переносного контрольно-измерительного прибора, имеющего в своем составе специализированные блоки аналоговой и цифровой электроники и осуществляющего все измерения под управлением персонального компьютера, описана в патентах KR101727504, KR101670760, KR101670762. Усилие, прикладываемое прибором, находится в интервале 0,01 до 2 кгс, а перемещение – от 0,1 до 30 мкм, что достаточно для измерения механической прочности широкого круга объектов. Прочность, в свою очередь, может быть с достаточной степенью надежности определена исходя из диаграммы напряжение – пластическая деформация, получаемой прибором.

При реализации измерительной схемы одной из научно-технических проблем, имеющих место в указанных выше патентах, является миниатюризация компонентов прибора в части кинематического устройства приложения нагрузки. Поэтому разрабатываемая конструкция твердомера предполагает компактное исполнение, которое позволит облегчить процесс эксплуатации.

В устройствах, защищаемых патентами US 9,702,798 и KR101531953, обозначена возможность пробоподготовки образца, проводимой при помощи специальных приспособлений, предусмотренных конструкцией. При дальнейшем усовершенствовании разрабатываемого портативного роботизированного твердомера планируется создание аналогичных технических решений.

Магнитная или немагнитная системы крепления устройства, позволяющие прибору автономно функционировать при жесткой установке его на объект исследования, освещены в патентах KR200482069,

KR101628705. В разрабатываемом оборудовании также предусмотрена система крепления двух типов, позволяющая прибору работать как на плоских образцах, так и на трубах, имеющих широкий диапазон диаметров.

Патент RU2611078 защищает способ определения остаточного напряжения с применением инструментального индентирования, соответствующую компьютерную программу и устройство для инструментального индентирования. Для получения данных производится внедрение сферы в материал, осуществляемое с серией частичных нагружений и разгрузений. Однако такой метод измерения механических свойств к этому моменту был неоднократно описан в открытых источниках. Пример такого источника – Haggag F. M., Nanstad R. K., and Braski D. N. Structural integrity evaluation based on an innovative field indentation microprobe, PVP — Vol. 170, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1989.

Кроме того, существует целый ряд запатентованных методик проведения измерений, осуществляемых при помощи приборов, защищаемых патентами, которые были указаны выше.

Патент KR101685507 описывает процедуру измерения межфазной адгезии и устройство, при помощи которого она проводится. Патент US 9,702,798 (аналогичный KR101707492) описывает метод оценки вязкости разрушения с помощью инструментального индентирования.

Как следует из проведенного поиска, разрабатываемый портативный роботизированный твердомер займет выгодное место среди рассмотренных устройств, основной упор в развитии которых был до сих пор сделан на возможность получения диаграммы сигма-эпсилон без получения значения твердости. На основе проведенного патентного поиска можно сделать вывод как о возможности подачи патента на ряд полезных моделей, касающихся усовершенствования известных образцов, так о подаче заявок на получение патента на изделие в целом. Данный вывод касается как экспериментального

образца индентационного модуля iPoRTN так и модуля оперативного контроля механических свойств твердых материалов.

### 3. Анализ патентоспособности портативного роботизированного твердомера

В данный момент на рынке присутствует ряд аналогичных приборов, позволяющих производить схожие измерения для объектов и конструкций методом вдавливания сферического тела (Frontics AIS3000, ATC SSM-M1000). Ни одно из указанных выше изделий не способно восстанавливать трехмерную форму поверхности отпечатка и не проводит измерение контактного электрического сопротивления контакта для определения площади контакта в течение всего цикла нагружений-разгрузений, что планируется осуществить в рамках разработки портативного роботизированного твердомера. Кроме того, приведенные выше приборы являются весьма габаритными изделиями, в то время как в рамках изготавливаемого устройства планируется изготовить отдельный компактный модуль, производящий экспресс измерения твердости и модуля упругости в соответствии с ГОСТ 8.748-2011 (ISO 14577). Данное изделие должно занять промежуточное место между портативными ультразвуковыми твердомерами, позволяющими измерять твердость только при условии наличия априорной информации о модуле юнга тестируемого материала, и существенно более дорогими приборами, осуществляющими инструментальное индентирование, и устройствами контроля диаграммы напряжение – пластическая деформация.

В портативном роботизированном твердомере планируется использовать известный способ приложения силы с помощью электромагнитного актюатора, а также стандартную систему регистрации перемещения. Однако данное обстоятельство не исключает патентоспособность портативного роботизированного твердомера. Датчики и силозадающие элементы сами по себе являются всего лишь составными частями устройства, включающего в себя также другие узлы, которые в совокупности обеспечивают применимость устройства для проведения исследований механических характеристик поверхности. Особенности

конструктивного решения закладываемого в портативный инструментальный твердомер не являются прямой компиляцией известных подходов и не следуют напрямую из известного уровня технического развития научного приборостроения.

Проведенный патентный анализ подтвердил актуальность и правильность выбранного пути решения задачи создания портативного роботизированного твердомера, имеющего возможность оперативного контроля механических свойств поверхностей изделий в отраслях машиностроения и металлообработки. Кроме того, проведенное исследование существующих технических решений позволило установить патентоспособность обеих модификаций разрабатываемого портативного роботизированного твердомера, использующего принципы инструментального индентирования, и обогатило полезными идеями разработчиков данного портативного роботизированного твердомера, часть из которых будет реализована в ходе выполнения данного проекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное патентное исследование показало патентоспособность портативного роботизированного твердомера iPoRTH. В результате анализа было выявлено, что существующие твердомеры, применяющиеся для работы в полевых условиях, не могут использоваться для восстановления трехмерной формы поверхности отпечатка, и не проводят измерение контактного электрического сопротивления контакта, что планируется осуществить в рамках разработки портативного роботизированного твердомера. Разрабатываемый прибор позволит проводить исследования таких объектов, что, в свою очередь, продолжит развитие нанотвердомеров, в том числе, совмещенных с функцией сканирования, в новом направлении. В разрабатываемом портативном роботизированном твердомере iPoRTH используются элементы, известные ранее, однако оба устройств могут быть запатентованы как целостная конструкция.

В ходе дополнительных патентных исследований представляется целесообразным детальное исследование патентной чистоты элементов конструкции портативного роботизированного твердомера (экспертиза прибора на патентную чистоту, обоснование мер по обеспечению его патентной чистоты и беспрепятственному производству и реализации прибора в стране и за рубежом), анализ конкурентоспособности портативного роботизированного твердомера, эффективности его использования по назначению, соответствия тенденциям и прогнозу развития.

Подготовка заявок на патенты будет проводиться на следующих этапах работ по данной ПНИЭР при получении РИД.



ПРИЛОЖЕНИЕ АА. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий отделом ФГБНУ ТИСНУМ  
кандидат физ.-мат. наук

А.С. Усеинов

2 октября 2017 г.

М.П.

ЗАДАНИЕ № 1  
на проведение патентных исследований

Тема ПНИЭР:	«Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях»
Шифр:	14.577.21.0274
Этап ПНИЭР:	Этап № 1. «Обзор проблемы, разработка радиоэлектронных узлов, разработка и изготовление индентационного измерительного модуля, проведение исследовательских испытаний»
Сроки выполнения этапа ПНИЭР:	Начало: 26.09.2017 Окончание: 29.12.2017
Задачи патентных исследований:	1) Исследование технического уровня разработок в области создания и использования устройств, проводящих измерения механических свойств и рельефа поверхности в условиях промышленного производства; 2) Исследование тенденций развития приборов, измеряющих механические свойства поверхности при сквозном контроле как готовой продукции, так и элементов крупногабаритных узлов и агрегатов; 3) Исследование патентоспособности портативного роботизированного твердомера.

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения. Начало - окончание	Отчетные документы
Исследование технического уровня разработок в области создания и использования устройств, проводящих измерения механических свойств и рельефа поверхности в условиях промышленного производства	Отдел исследования физико-механических свойств	Гладких Е.В. И.И. Маслеников	02.10.2017 – 15.11.2017	Анализ технического уровня разработок в исследуемой области техники
Исследование тенденций развития приборов, измеряющих механические свойства поверхности при сквозном контроле как готовой продукции, так и элементов крупногабаритных узлов и агрегатов	Отдел исследования физико-механических свойств	Гладких Е.В. И.И. Маслеников	02.10.2017 – 15.11.2017	Анализ тенденций и прогноз развития исследуемой области техники
Исследование патентоспособности портативного роботизированного твердомера	Отдел исследования физико-механических свойств	Гладких Е.В. И.И. Маслеников	02.10.2017 – 15.11.2017	Анализ патентоспособности портативного роботизированного твердомера

Заведующий отделом ФГБНУ ТИСНУМ



подпись

А. С. Усеинов  
расшифровка

15.11.2017  
дата

Руководитель  
патентного подразделения


подпись

Г.Н. Кремкова  
расшифровка

15.11.2017  
дата

## ПРИЛОЖЕНИЕ АБ. РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА

### РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА № 1

2 октября 2017  
дата составления регламента

Тема ПНИЭР	Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях
Шифр:	14.577.21.0274
Этап ПНИЭР:	№ 1. Обзор проблемы, разработка радиоэлектронных узлов, разработка и изготовление индентационного измерительного модуля, проведение исследовательских испытаний
Номер и дата утверждения Задания:	№ 1 от 2 октября 2017 г.
Цель поиска информации:	Выяснение технического уровня разработок в области приборов, осуществляющих оперативный контроль механических свойств поверхностей изделий в отраслях машиностроения и металлообработки, а также определение патентоспособности портативного роботизированного твердомера, использующего принципы инструментального индентирования.
Начало поиска:	2 октября 2017 г
Окончание поиска:	15 ноября 2017 г.
Обоснование регламента поиска:	В соответствии с требованиями технического задания поиск проводился по патентной литературе в объеме патентных фондов РФ и развитых стран, по ведущим базам данных патентной информации, а также в научно-технической литературе, включая отечественные и зарубежные научные журналы, обзоры и монографии. Глубина поиска не менее 10 лет.

Таблица ИБ.1

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск								Ретроспективность	Наименование информационной базы (фонда)
		Наименование	Классификационные рубрики: МКИ*, НК И* и др	Наименование	Рубрики УДК* и другие	Наименование	Код товара: ГС*, СМТК*, БТН*	Наименование	Классификационные индексы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств технических изделий: приборы, позволяющие проводить исследование методом инструментального индентирования в условиях промышленного производства	РФ, США, Корея	Полные описания изобретений к патентам в национальных и международных базах патентной информации США» Google patent”, Европы “Espacenet”, России «Роспатент»	G01N3/00, G01N3/08, G01N3/14, G01N3/30, G01N3/40, G01N3/42, G01N3/48, G01N19/04, G01N21/08, G01B11/30, G01B17/02, G01D21/00, G01D21/02, G06F17/11, F16B2/00, F16B2/08, F16B2/10, C25F3/16, H02N15/00							1988-2017	Базы данных патентных ведомств США “Google patent”, Европы “Espacenet”, России «Роспатент»

Заведующий отделом ФГБНУ ТИСНУМ


  
подпись
А.С. Усенов  
расшифровка

15.11.2017

дата

Руководитель  
патентного подразделения

  
подпись
Г.Н. Кремкова  
расшифровка

15.11.2017

дата

## ПРИЛОЖЕНИЕ АВ. ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

### ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

Тема ПНИЭР	Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях
Шифр:	14.577.21.0274
Этап ПНИЭР:	№ 1. Обзор проблемы, разработка радиоэлектронных узлов, разработка и изготовление индентационного измерительного модуля, проведение исследовательских испытаний
Задание на выполнение поиска	Задание на выполнение патентных исследований № 1 от 02.10.2017, утверждено заведующим отделом, руководителем работ по ПНИЭР А.С. Усеиновым Регламент поиска от 02.10.2017
Начало поиска:	2 октября 2017 г.
Окончание поиска:	15 ноября 2017 г.
Сведения о выполнении поиска:	Регламент поиска выполнен полностью.
Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований	Проведение дополнительных патентных исследований при получении результатов интеллектуальной деятельности в процессе выполнения будущих этапов ПНИЭР.

Материалы, отобранные для анализа, приведены в таблице АВ.1.

Таблица АВ.1 — Патентная документация.

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, классификационный индекс	Заявитель (патентобладатель) Страна. Номер заявки, Дата приоритета, дата публикации в бюлл.	Название изобретения	Сведения о действии и охранного документа или причины его аннулирования
1	2	3	4	5
Портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств	Патент США 9,702,798 G01N 3/00 G01N 3/08 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, KR) 15/269,012 19.09.2016 11.07.2017	Method for evaluating fracture toughness using instrumented indentation testing	действующий
технических изделий, методы контроля физико-механических свойств: - датчик, позволяющий прикладывать силу и измерять перемещение; - система крепления прибора к измеряемому изделию; - индентор пирамидальной	Патент Российской Федерации 2611078 G01N 3/00 G01N 3/40 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 2015132173 31.01.2013 21.02.2017	Способ определения остаточного напряжения с применением инструментального индентирования, носитель информации с соответствующей компьютерной программой и устройство для инструментального индентирования, предназначенное для реализации инструментального индентирования с использованием носителя информации	действующий

й и сферообразны й	Патент Кореи 101727504 G01N 3/00 G01N 3/08 G01N 3/14	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20160060577 18.05.2016 17.04.2017	Apparatus for Portable Verifying Tester of Measuring Instrument having Radiation Shield	действуе т
	Патент Кореи 101707492 G01N 3/00 G01N 3/40 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20160095742 27.07.2016 17.02.2017	Evaluating Method Of The Fracture Toughness Using Instrumented indentation testing	действуе т
	Патент Кореи 200482069 G01N 3/00 G01N 3/30	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20150002429 15.04.2015 14.12.2016	Portable Fixing Apparatus for Tester	действуе т
	Патент Кореи 101670760 G01N 3/00 G01N 3/40 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20150046126 01.04.2015 01.11.2016	Apparatus for Indentation Test	действуе т
	Патент Кореи 101670762 G01D 21/00 C25F 3/16 F16B 2/10 G01B 11/30 G01B 17/02 G01D 21/02 G01N 21/88 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20140166295 26.11.2014 01.11.2016	Portable Testing Apparatus	действуе т
	Патент Кореи 101628705 G01D 21/00 F16B 2/00 F16B 2/08 F16B 2/10 H02N 15/00	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 26.11.2014 10.06.2016	Portable Fixing Apparatus for Tester	действуе т

	Патент Кореи 101531953 G01B 11/30 C25F 3/16	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20140166293 26.11.2014 29.06.2015	Portable Apparatus for Surface Inspection and Eletrolytic Polishing	действуе т
	Патент Кореи 101685507 G01N 19/04 G01N 3/42 G06F 17/11	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 20150047661 03.04.2015 13.12.2016	Test method of interfacial adhesion	действуе т
	Патент Японии 3702203 G01N 3/48	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 2001228789 12.01.2001 05.10.2005	Press-tester for continuous press-fit test, the physical properties measurement method and physical properties calculation method using the same	действуе т
	Патент Японии 3959484 G01N 3/48	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 2003100724 04.04.2003 15.08.2007	Residual stress data measuring method using the residual stress measuring apparatus, and residual stress measuring method, and a computer- readable recording medium storing the residual stress measurement program	действуе т
	Патент Японии 4784774 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 2007540245 11.09.2004 05.10.2011	Fracture toughness measurement method using the continuous injection method	действуе т



Патент Японии 5017600 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 2009548978 06.02.2007 05.09.2012	Evaluation method of unequal direction residual stress using the instrumented indentation test method	действуе т
Патент США 6,718,820 G01N 3/48	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 10209237 12.01.2001 13.04.2004	Apparatus for indentation test and method for measuring mechanical properties using it	действуе т
Патент США 6,851,300 G01N 3/48	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 10404816 04.04.2002 08.02.2005	Apparatus for determining residual stress, method for determining residual stress data using it, residual stress determining method using it and recording medium thereof	действуе т
Патент США 7,472,603 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 11793274 16.12.2004 06.01.2009	Evaluating method of the residual stress determining method using the continuous indentation method	действуе т
Патент США 7,487,051 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 11667229 09.11.2004 03.02.2009	Evaluating method of the fracture toughness using the continuous indentation method	действуе т
Патент США 8,214,162 G01N 3/00 G01N 3/40 G01N 3/42	Frontics, Inc, (Seoul, Korea) 12526166 06.02.2007 03.07.2012	Estimation of non- equibiaxial stress using instrumented indentation technique	действуе т

	Патент США 4,852,397 G01N 3/00 G01N 3/40 G01N 3/42	Fahmy M. Haggag 323,967 15.01.1988 15.03.1989	Field indentation microprobe for structural integrity evaluation	не действуе т
--	--	---	---	---------------------

**ПРИЛОЖЕНИЕ АГ. ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПАТЕНТОСПОСОБНОСТЬ ОБЪЕКТА  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

АГ.1 Технический уровень и тенденции развития объекта хозяйственной деятельности  
Форма АГ.1.1 Показатели технического уровня объекта техники

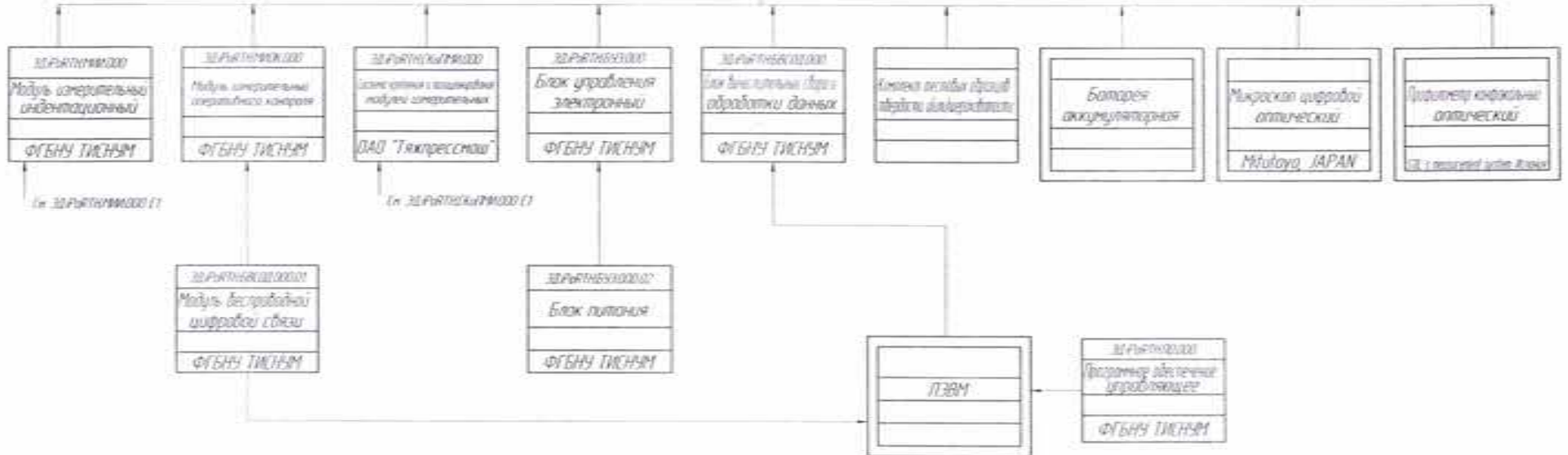
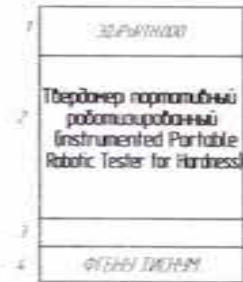
*	Значения показателей					
	Наименование показателей	Объект разработки (производства) на 2017 г.	Отечественные и зарубежные объекты аналогичного назначения (с указанием моделей фирм, стран, года известности) Возможность и эффективность их использования для решения задач поставленных в ТЗ на ПНИ	Объект по государственному стандарту	Международные и национальные стандарты	Прогноз на 2018 г.
1	2	3.1	3.2	4	5	6
		Frontics AIS3000, 2004	ATC SSM-M1000, 1996	Измерительный прибор	Измерительный прибор	
техико-экономические	портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств технических изделий	высокое соотношение цена/качество	высокое соотношение цена/качество	-#-	-#-	Создание и использование портативного роботизированного твердомера
эффективность использования по назначению	портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств технических изделий	невозможно использовать в ПНИ	невозможно использовать в ПНИ	-#-	-#-	Создание и использование портативного роботизированного твердомера
технические	портативные устройства автоматизированного контроля	находятся в другом диапазоне	находятся в другом диапазоне	-#-	-#-	Создание и использование портативного роботизированного твердомера

	физико-механических свойств технических изделий					
эргономические	портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств технических изделий	не соответствуют	не соответствуют	-#-	-#-	Создание и использование портативного роботизированного твердомера
Импортозависимость	портативные устройства автоматизированного контроля физико-механических свойств технических изделий	низкая	низкая	-#-	-#-	Создание и использование портативного роботизированного твердомера

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЭКД ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА  
ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTH

- Схема деления структурная ЭД.iPoRTH.000 E1;
- Схема деления структурная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 E1;
- Чертеж общего вида ЭД.iPoRTH.МИИ.000 BO;
- Схема электрическая функциональная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 Э2;
- Перечень элементов схемы электрической функциональной ЭД.iPoRTH.МИИ.000 ПЭ Э2;
- Схема электрическая соединений и подключения объединенная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 Э0;
- Чертеж Корпус нижний ЭД.iPoRTH.МИИ.001;
- Чертеж Пластина-ограничитель ЭД.iPoRTH.МИИ.002;
- Чертеж Корпус верхний-блок 1 ЭД.iPoRTH.МИИ.003;
- Чертеж Корпус верхний-блок 2 ЭД.iPoRTH.МИИ.004;
- Чертеж Корпус верхний-блок 3 ЭД.iPoRTH.МИИ.005;
- Чертеж Крышка верхняя ЭД.iPoRTH.МИИ.006;
- Чертеж Пластина подвижная ЭД.iPoRTH.МИИ.007;
- Чертеж Крышка прижимающая ЭД.iPoRTH.МИИ.008;
- Чертеж Корпус внутренний ЭД.iPoRTH.МИИ.009;
- Чертеж Пластина-фиксатор ЭД.iPoRTH.МИИ.010;
- Чертеж Уголок-фиксатор ЭД.iPoRTH.МИИ.МИИ.011;
- Чертеж Наконечник индентирующий ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.001;
- Чертеж Гайка накладная ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.002;
- Чертеж Гайка упорная ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.003;
- Чертеж Контрогайка ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.004;
- Чертеж стакан ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.005;
- Чертеж Корпус датчика силы ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.01.001;

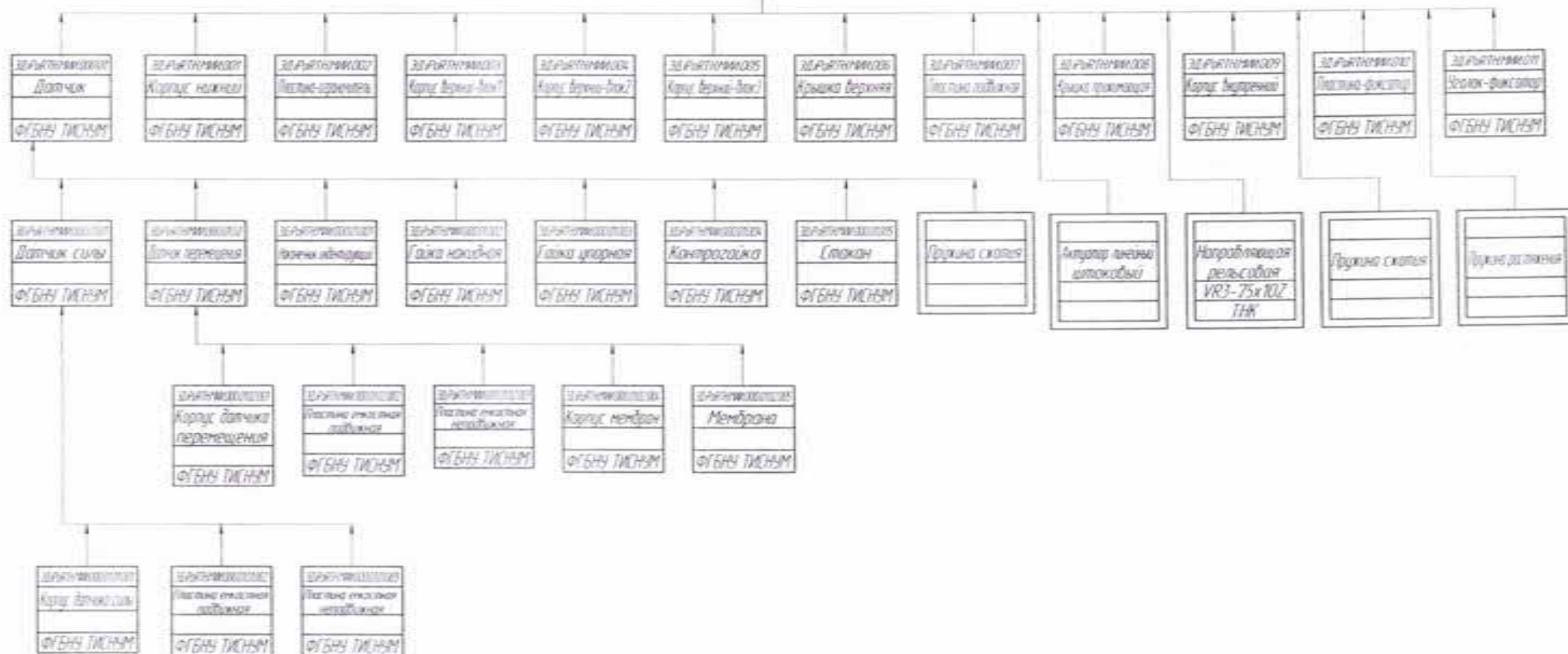
- Чертеж Корпус датчика перемещения  
ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.001;
- Чертеж Корпус мембран ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.004;
- Чертеж Мембрана ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.005.



В строке 4 указываем разработчика.

		ЗЕРКАТН000 Е1			
№ п/п	Исполнитель	Дата	Подпись	№ п/п	Исполнитель
1	Иванов И.И.	15.05.2018	[Подпись]	1	Иванов И.И.
2	Петров П.П.	15.05.2018	[Подпись]	2	Петров П.П.
3	Сидоров С.С.	15.05.2018	[Подпись]	3	Сидоров С.С.
4	Смирнов С.С.	15.05.2018	[Подпись]	4	Смирнов С.С.
5	Кузнецов К.К.	15.05.2018	[Подпись]	5	Кузнецов К.К.
6	Лебедев Л.Л.	15.05.2018	[Подпись]	6	Лебедев Л.Л.
7	Мухоморов М.М.	15.05.2018	[Подпись]	7	Мухоморов М.М.
8	Новиков Н.Н.	15.05.2018	[Подпись]	8	Новиков Н.Н.
9	Попов П.П.	15.05.2018	[Подпись]	9	Попов П.П.
10	Рябенко Р.Р.	15.05.2018	[Подпись]	10	Рябенко Р.Р.
11	Соловьев С.С.	15.05.2018	[Подпись]	11	Соловьев С.С.
12	Тихонов Т.Т.	15.05.2018	[Подпись]	12	Тихонов Т.Т.
13	Федотов Ф.Ф.	15.05.2018	[Подпись]	13	Федотов Ф.Ф.
14	Харьков Х.Х.	15.05.2018	[Подпись]	14	Харьков Х.Х.
15	Цыганов Ц.Ц.	15.05.2018	[Подпись]	15	Цыганов Ц.Ц.
16	Чайков Ч.Ч.	15.05.2018	[Подпись]	16	Чайков Ч.Ч.
17	Шаров Ш.Ш.	15.05.2018	[Подпись]	17	Шаров Ш.Ш.
18	Щербак Ш.Ш.	15.05.2018	[Подпись]	18	Щербак Ш.Ш.
19	Юрьев Ю.Ю.	15.05.2018	[Подпись]	19	Юрьев Ю.Ю.
20	Яковлев Я.Я.	15.05.2018	[Подпись]	20	Яковлев Я.Я.

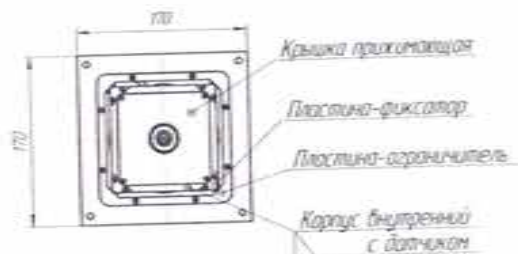
1	ЗЕРКАЛЬНИКОМ
2	Твердомер портативный роботизированный Instrumented Portable Robotic Tester for Hardness
3	Модуль измерительный индентационный
4	ФГБНУ ТИХИМ



В строке 4 указать шифр

		ЗЕРКАЛЬНИКОМ Е1		11
Исполнитель	И.И.И.	Проверенный	И.И.И.	11
Составитель	И.И.И.	Проверенный	И.И.И.	11
Утвержден	И.И.И.	Проверенный	И.И.И.	11
Дата	И.И.И.	Проверенный	И.И.И.	11
ФГБНУ ТИХИМ				





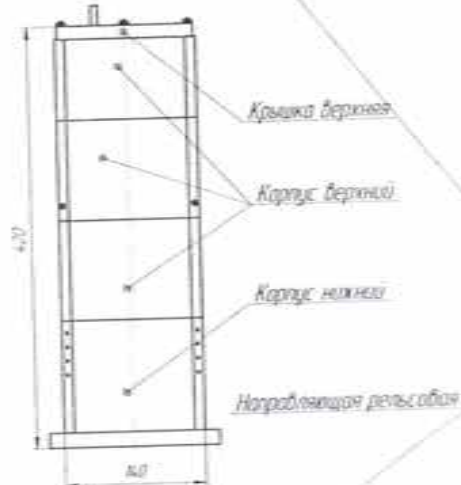
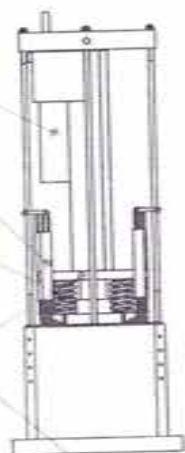
На вид карусель берем не показан

Актуатор линейный штоковый

Пружина растяжения

Пружина сжатия

Пластина подвижная



На вид карусель нижняя не показан

Стойка-фиксатор

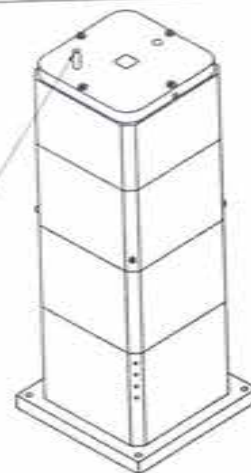


Перетяжки каруса внутреннего с датчиком  
эта система каруса нижняя - 50 мм

Часть измерителя индукции

**Внешний вид модуля измерительного индукционного**

На вид карусель не показан и упрощен



**Техническая характеристика**

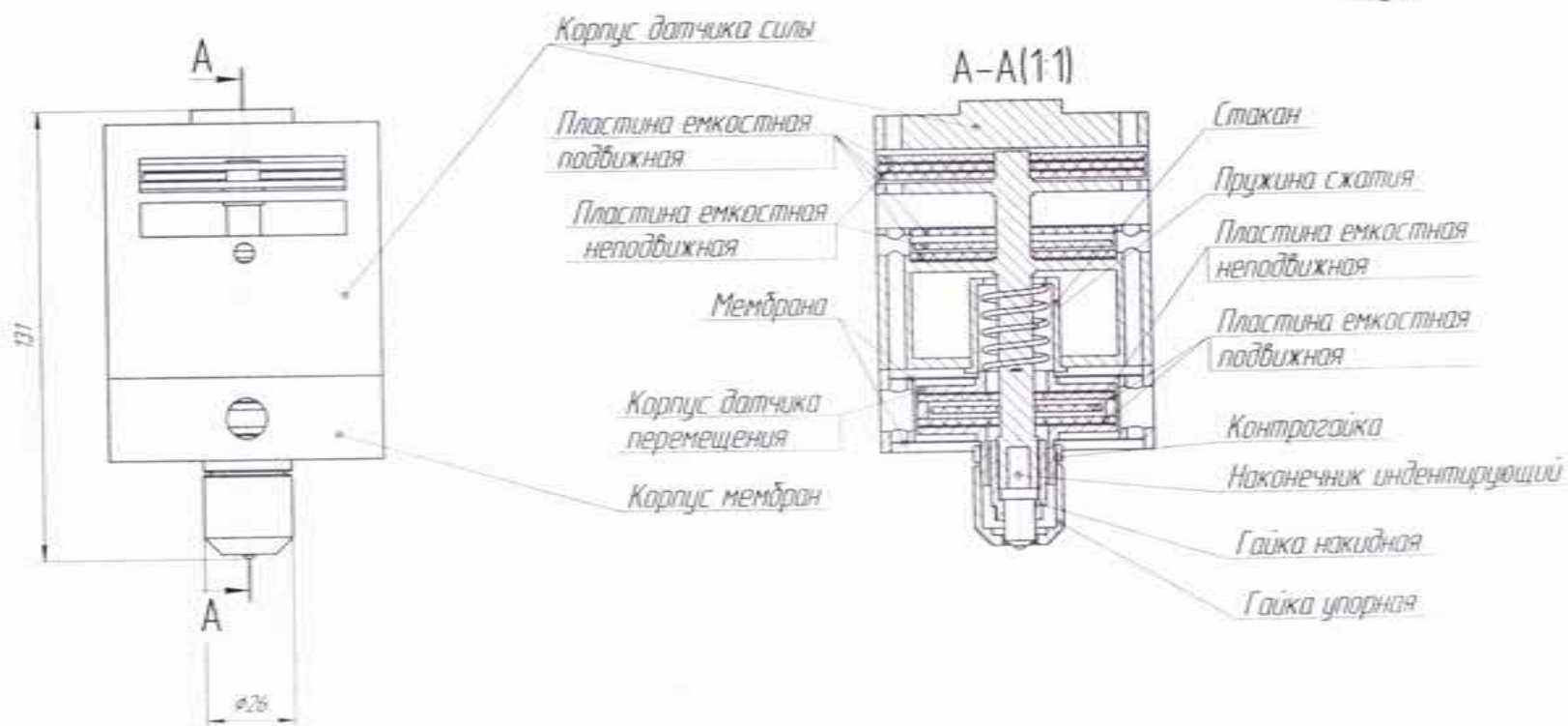
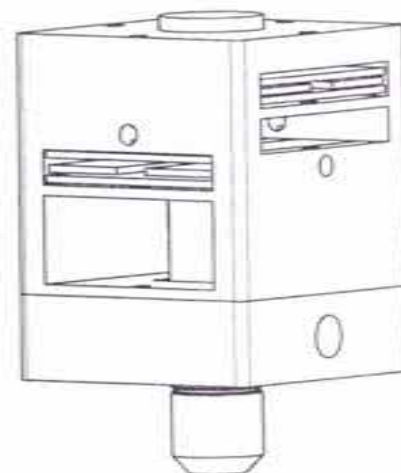
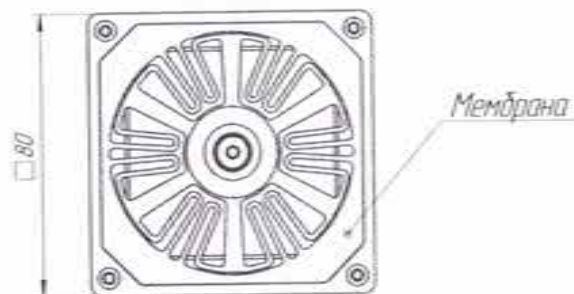
Рабочий диапазон рабочей температуры	Температура воздуха -10 °С до +30°С Амплитуда давления от 700 до 760 мм рт.ст. Амплитуда влажности от 20% до 80% Интервалы длины светового и инфракрасного излучения в диапазоне частот от 1 Гц до 100 Гц по параметру координатного ускорения не более 10 м/с <sup>2</sup>
Тип материала индуктивности для рабочей поверхности	Сферические или сферические и ферромагнитные или немагнитные призматические или конические сферы с радиусом кривизны конуса от 300 мм до 2,5 м
Объем измерений: объем данных	рабочий
Диапазон измерений: значения скорости $V$ с погрешностью $\pm 0,1 \times V \pm 0,1$ ГД	от 0,1 до 25 ГД
Диапазон измерений: значения модуля ускорения $E$ с погрешностью $\pm 0,1 \times E \pm 0,5$ ГД	от 3 до 450 ГД
Диапазон измерений: значения скорости деформации $\epsilon$ с погрешностью $\pm 0,1 \times \epsilon \pm 0,1$ ГД	от 0,1 до 15 ГД
Диапазон измерений: значения деформации $\epsilon$ с погрешностью $\pm 0,1 \times \epsilon \pm 0,1$ ГД	от 0,5 до 15 ГД
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ в диапазоне измерения $d$ и модуль ускорения $\epsilon$ с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,1$ мм	от 5 до 25 мм
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ при измерении диаметра шарика-индуктивности с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,5$ мм	от 1 мм до 1 мм
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ в диапазоне измерения диаметра шарика-индуктивности с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,5$ мм	от 1 мм до 300 Н
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ в диапазоне измерения диаметра шарика-индуктивности с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,5$ мм	от 2,8 до 2,8
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ в диапазоне измерения диаметра шарика-индуктивности с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,5$ мм	не менее 100 мм
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ в диапазоне измерения диаметра шарика-индуктивности с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,5$ мм	от 10 до 300 г
Диапазон измерения: значения индуктивности $d$ в диапазоне измерения диаметра шарика-индуктивности с погрешностью $\pm 0,1 \times d \pm 0,5$ мм	15 кг

Чертеж рассматривать совместно с соответствующим этапом отчетом по прикладному научному исследованию экспериментальной разработки

3D РРНТНМН1000 В0	
Исполнитель: <i>С.В. Ковалев</i>	Проверено: <i>С.В. Ковалев</i>
Дата: <i>20.04.2019</i>	Дата: <i>20.04.2019</i>
Место: <i>С.В. Ковалев</i>	Место: <i>С.В. Ковалев</i>
ИЗДАТЕЛЬСТВО	

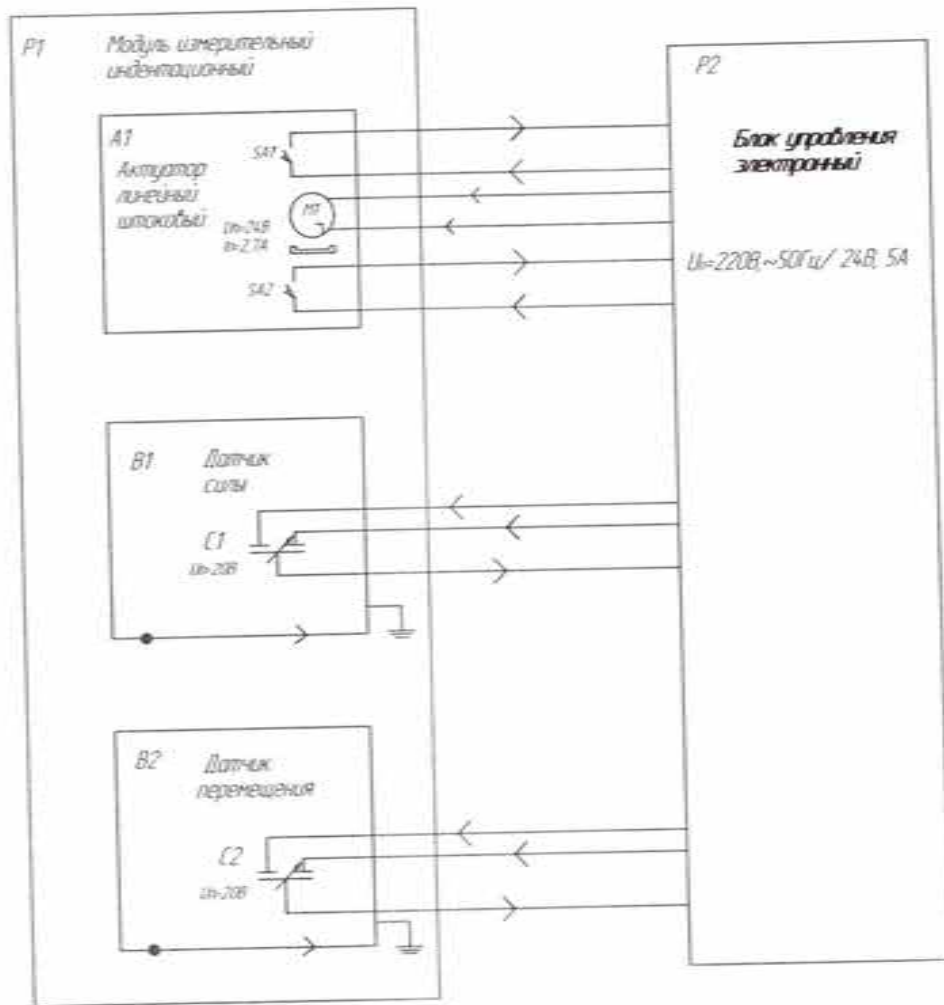
# Датчик

Внешний вид датчика



ЭД.РoRTHMM.000.00  
 2011.01.01 2011.01.01 2011.01.01 2011.01.01

Лист 1 из 1  
 Дата: 11.08.2018  
 Проект: 008  
 Лист 1 из 1  
 Дата: 11.08.2018  
 Проект: 008



ЭЛ.Р08ТНММ.000 Э2				Лист	Всего	Масштаб
Исполнитель	ИП	Дата	Стр.			
Проверенный	Исполнитель	Дата	Стр.			11
Специальность	Проверенный	Дата	Стр.			
Исполнитель	Проверенный	Дата	Стр.			

Объект: ФГУП ТИСКУМ  
 Проект: 008

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание	Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подп. и дата	
				Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Лист	Листов				
A1	Актуатор линейный штоковый 24В, 3000 Н	1													
B1	Датчик силы элемента Р1	1													
B2	Датчик перемещения элемента Р1	1													
M1	Двигатель элемента А1	1													
C1	Преобразователь емкостной элемента В1	1													
C2	Преобразователь емкостной элемента В2	1													
P1	Модуль измерительный индентационный	1													
P2	Блок управления электронный	1													
SA1,SA2	Микропереключатель концевой элемента А1	2													
<b>ЭД.ІРoRTH.MИИ.000 ПЭ Э2</b>															
Инв. № подл.	Разраб.	Мелекесова	СМ	10.11.17	Твердомер портативный роботизированный (Instrumented Portable Robotic Tester for Hardness) Модуль измерительный индентационный	Лит.	Лист	Листов							
	Проб.	Решетов	RR	10.11.17			1	1							
Инв. № подл.	Н.контр.	Сапрыкин	С	10.11.17	Перечень элементов схемы электрической функциональной	<b>ФГБНУ ТИСНУМ</b>									
	Утв.	Усеинов	У	10.11.17											

ЭД.РoPRTН.МИИ.000 Э0

Лист документа

Страна №

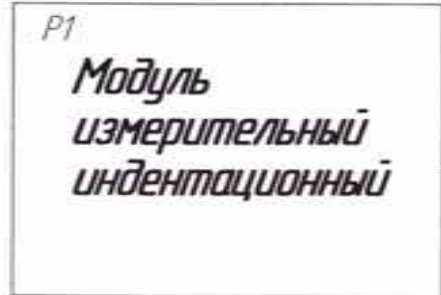
Лист и дата

Лист и дата

Лист и дата

Лист и дата

Лист и дата



Кабель питания и управления

XT1



Кабель электропитания

XT2

Разетка сети электропитания 220 В, ~50 Гц

XP1

XS1



Кабель электропитания

XT3

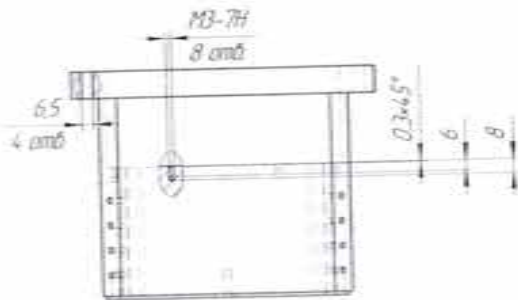
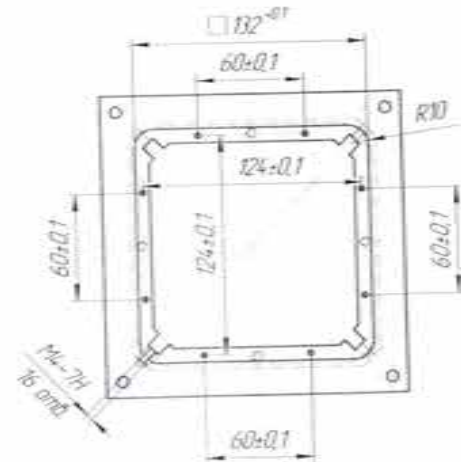
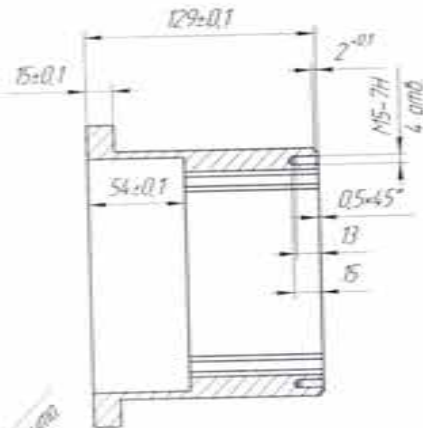
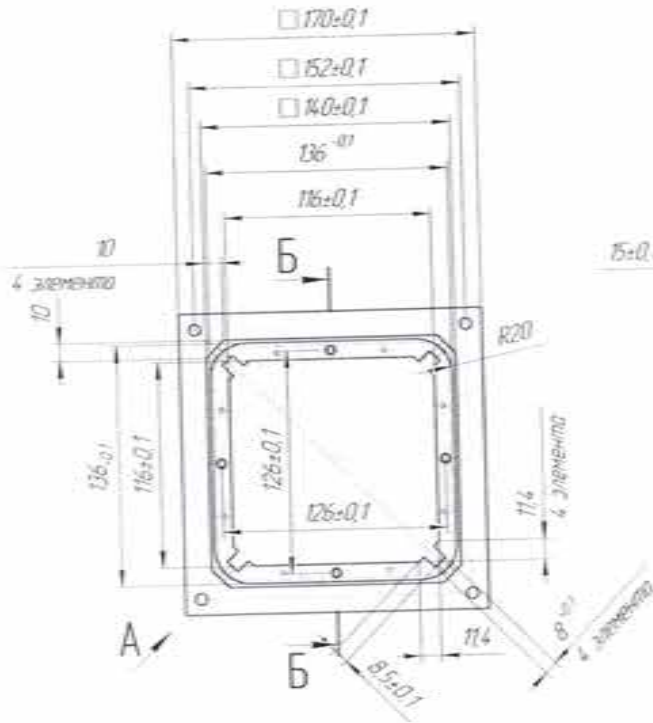
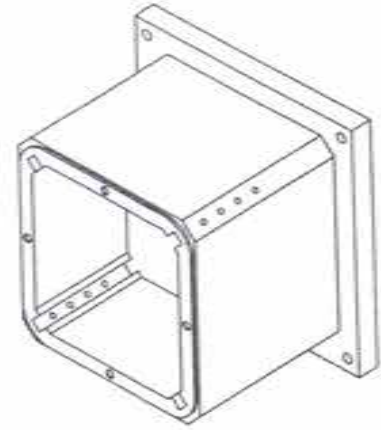
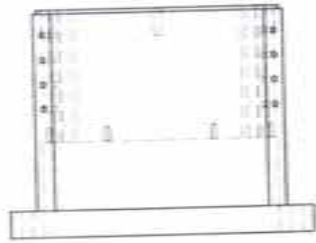
XP2

XS2

					ЭД.РoPRTН.МИИ.000 Э0			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Версия переносной работоспособности Instrumented Portable Ratchet Tester for Hiraress	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.		Мелекесова	М.И.	10.10.19				11
Проб.		Аншетаб	Р.В.	10.11.19	Модуль измерительный индентационный (селективный режим)	Лист	Листов	7
Контр.								
Исполн.		Сарыжин	Е.В.	10.11.19		ФГБНУ ТИСЧУМ		
Удобр.		Устинов	И.В.	10.11.19				
					Копировать	Формат А3		

ЭДПОРТНММ001

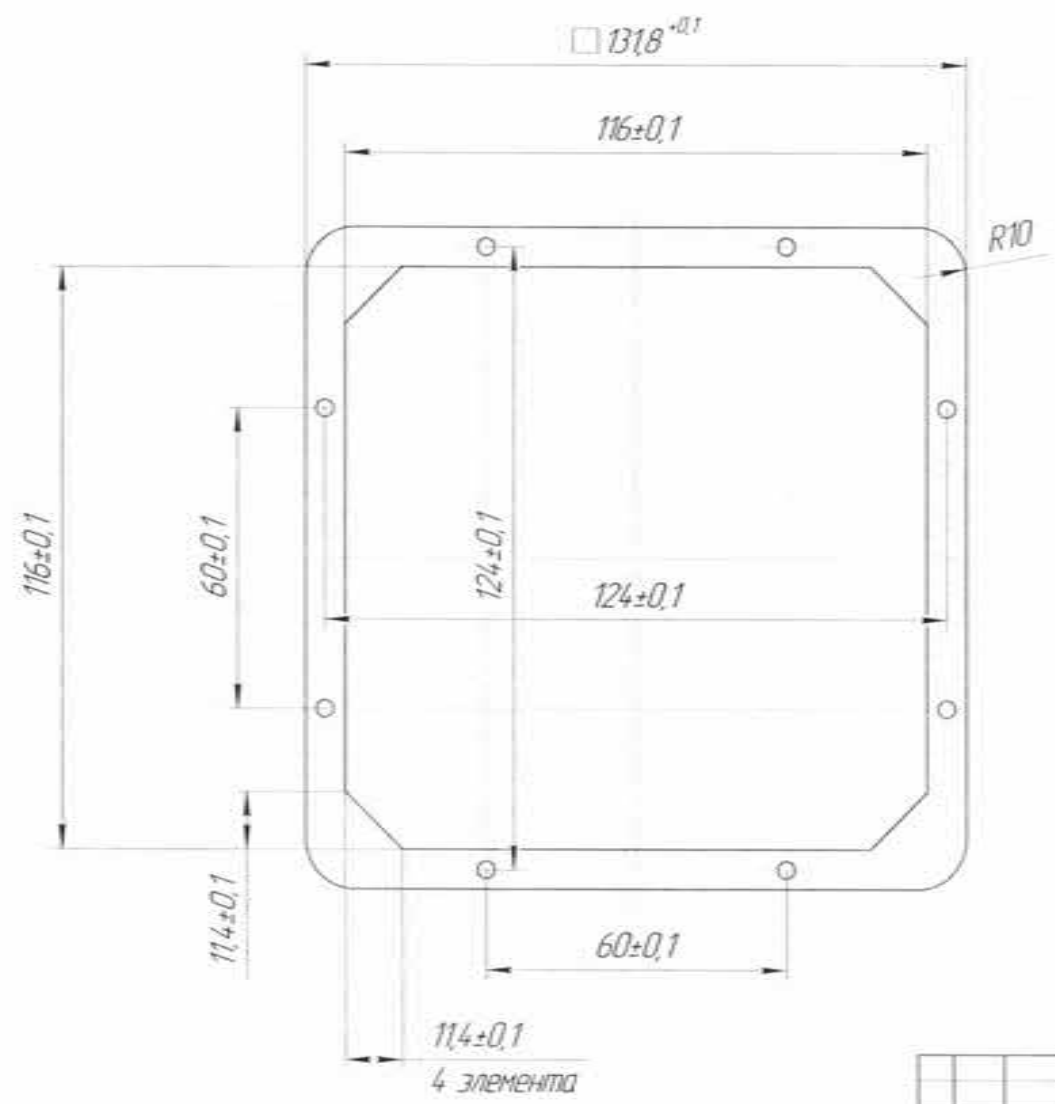
32 ✓(✓)



ЭДПОРТНММ001					№	№	№
Корпус	№	Дет.	Дет.	Корпус			12
Корпус	№	Дет.	Дет.	Корпус			
Корпус	№	Дет.	Дет.	Корпус			
Корпус	№	Дет.	Дет.	Корпус			
Корпус нижний					Д16 ГОСТ 4784-97 ФГБНУ ТИСКУМ		

3,2√(✓)

ЭД.РОРТН.ММ.002



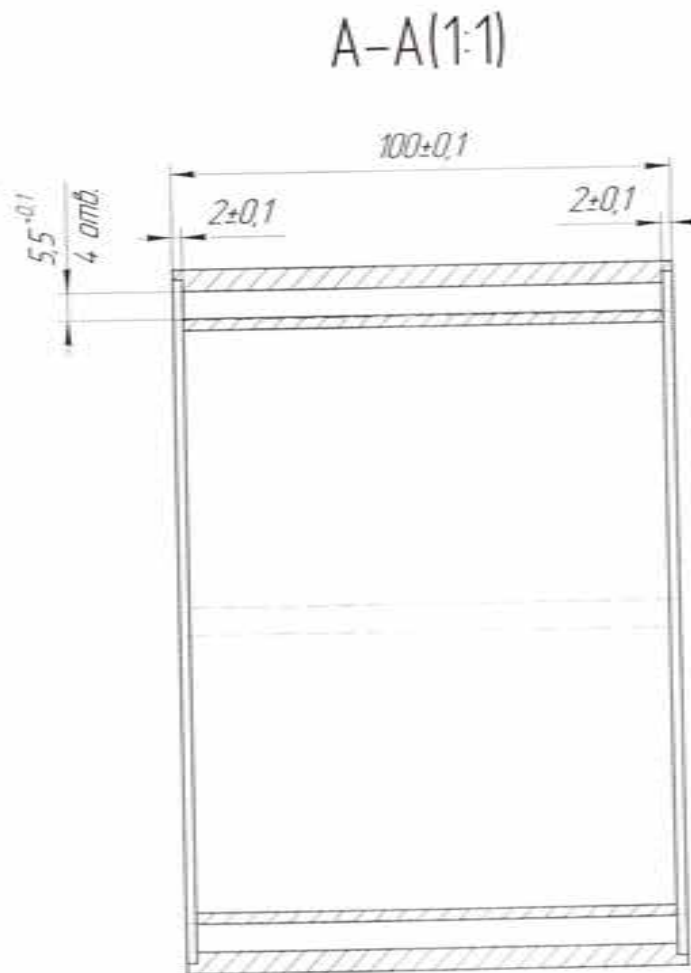
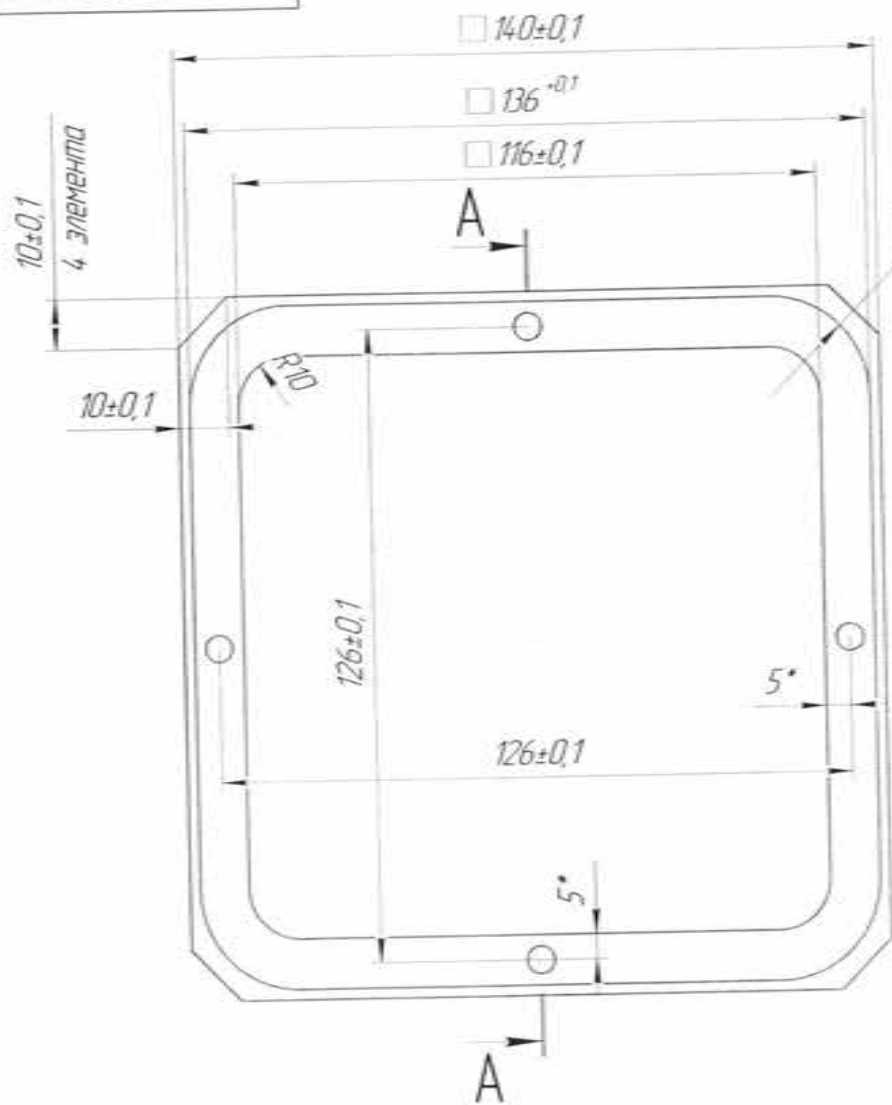
1 \*Размер для сборки

Лист 1 из 1  
 Дата: 10.11.17  
 Проект: РП.001  
 Исполнитель: М.А.И.  
 Проверил: Р.З.В.  
 Утвердил: М.А.И.

ЭД.РОРТН.ММ.002				Лист	Масса	Масштаб
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата			1:1
Разраб.	Мележесова	М.А.И.	10.11.17			
Проб.	Решетов	Р.З.В.	11.11.17			
Т.контр.						
Исполн.	Согрыкин	Е.А.С.	10.11.17			
Удб.	Исаев	М.А.И.	10.11.17			
Д16 ГОСТ 4784-97				Лист	Листов	1
Котировка				ФГБНУ ТИСНУМ		
				Формат А3		

ЭД.РОРТН.МИИ.003

3,2 ✓(✓)



1 \*Размер для справки

Лист № 1  
Листов 1  
Лист № 1  
Листов 1  
Лист № 1  
Листов 1  
Лист № 1  
Листов 1

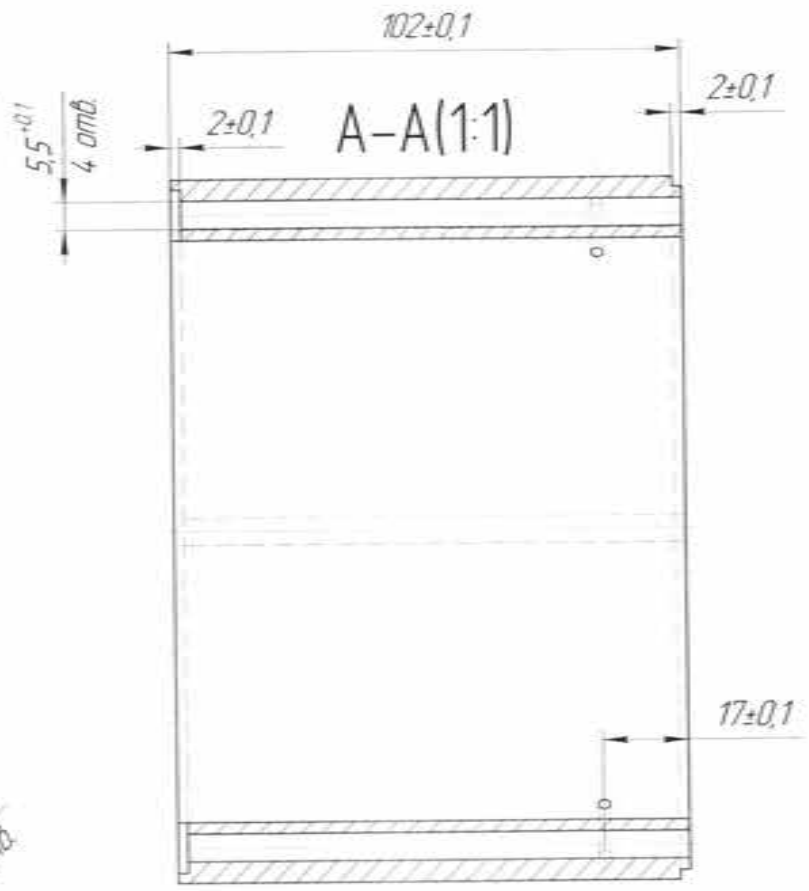
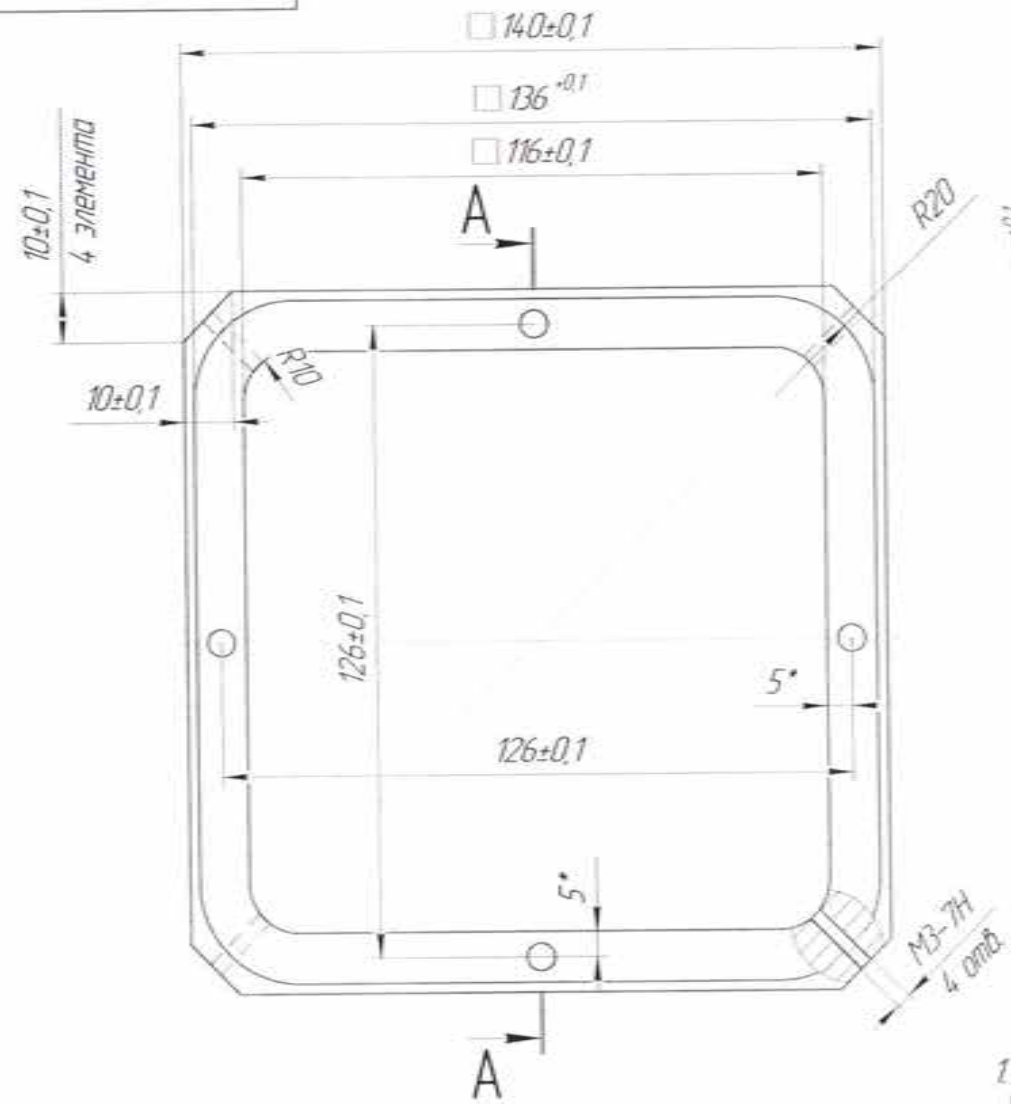
ЭД.РОРТН.МИИ.003				Лист	Масса	Материал
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Корпус верхний - блок 1		
Разраб.	Мележеско	В.С.	10.01.12			
Проб.	Рашетов	А.В.	10.01.12			
Г.контр.						
Исполн.	Сопрыкин	В.С.	10.01.12	Д16 ГОСТ 4784-97 ФГБНУ ТИСЧУМ		
Чел.	Угленов	И.В.	10.01.12	Формат А3		



ЭД.Р0РТН.МИИ.004

3,2 ✓(✓)

Лист 1  
 Корпус №  
 Вуз. шиф. №  
 Лист и дата  
 Лист и дата  
 Лист и дата  
 Лист и дата  
 Лист и дата

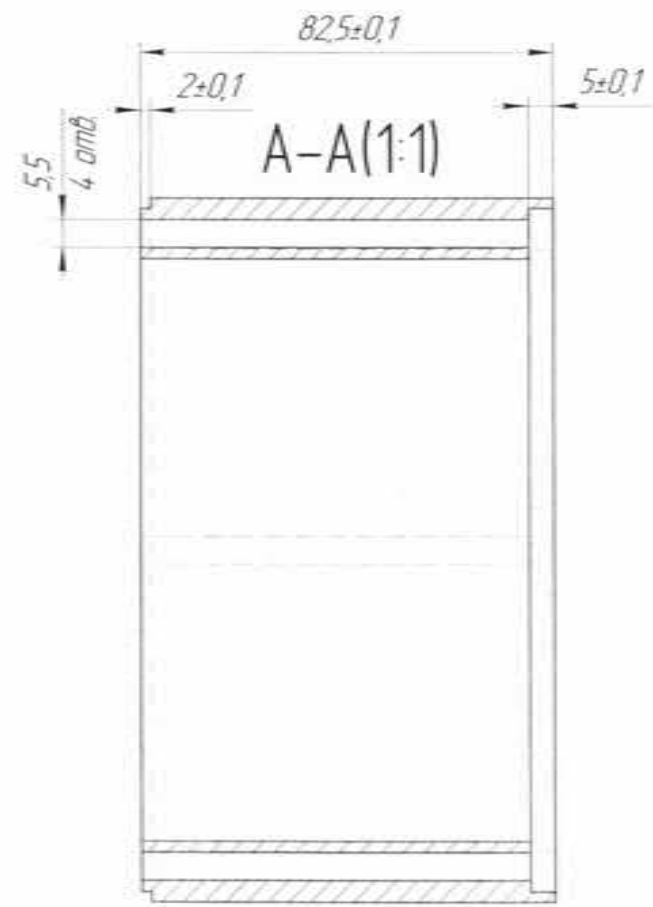
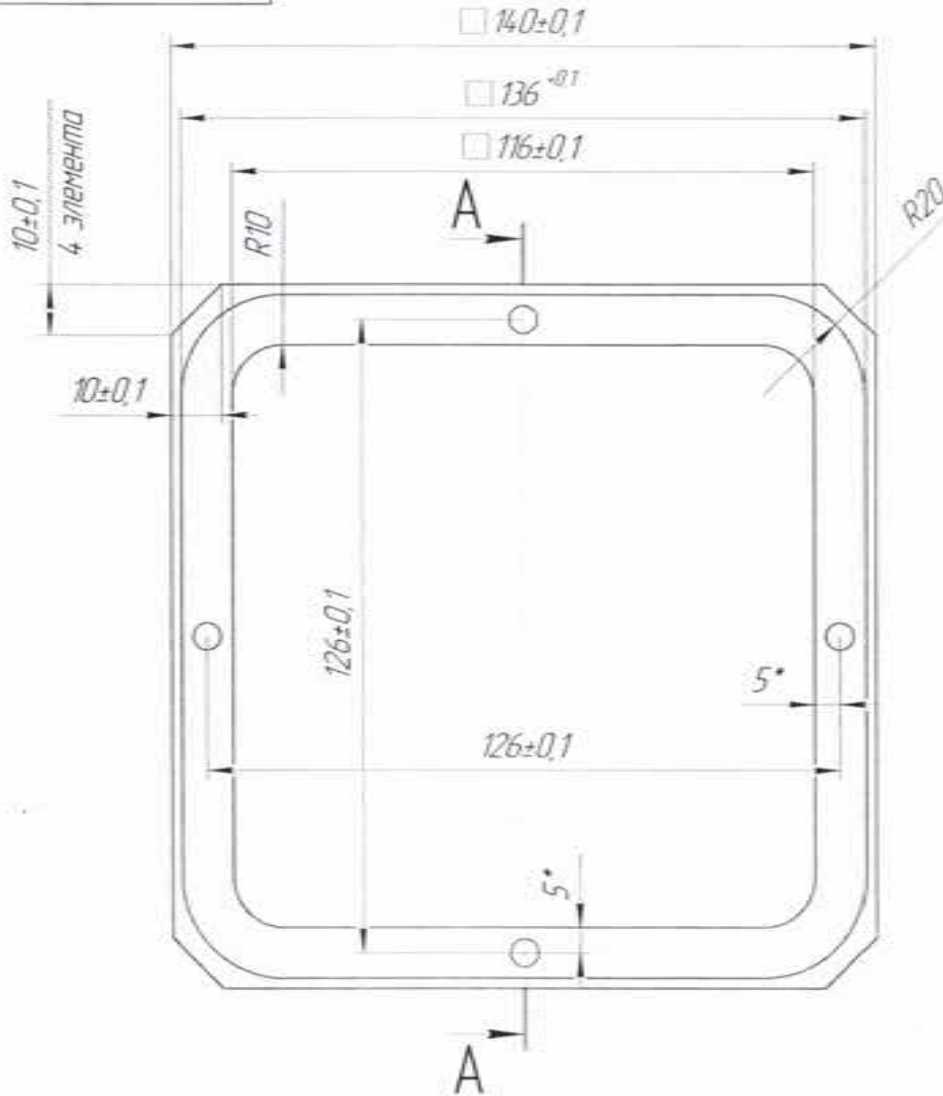


1. Размер для сборки

				ЭД.Р0РТН.МИИ.004			
Изм/Лист	№ докум	Подп.	Дата	Корпус верхний - блок 2	Лист	Масса	Масштаб
Разраб	Мелекесова	К.И.	08.12				1:1
Проб	Решетов	К.И.	01.17		Лист	Листов	1
Т.контр							
Исполн	Сарыжин	Е.В.	01.17	Д16 ГОСТ 4784-97	ФГБНУ ТИСНУМ		
Удб.	Усманов	И.И.	01.17	Корпусов	Формат А3		

ЭД.РОРТН.МИИ.005

3,2  
√(✓)



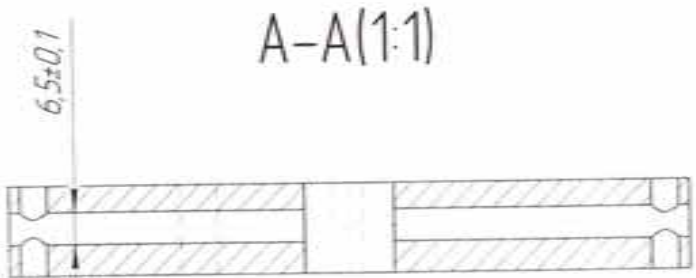
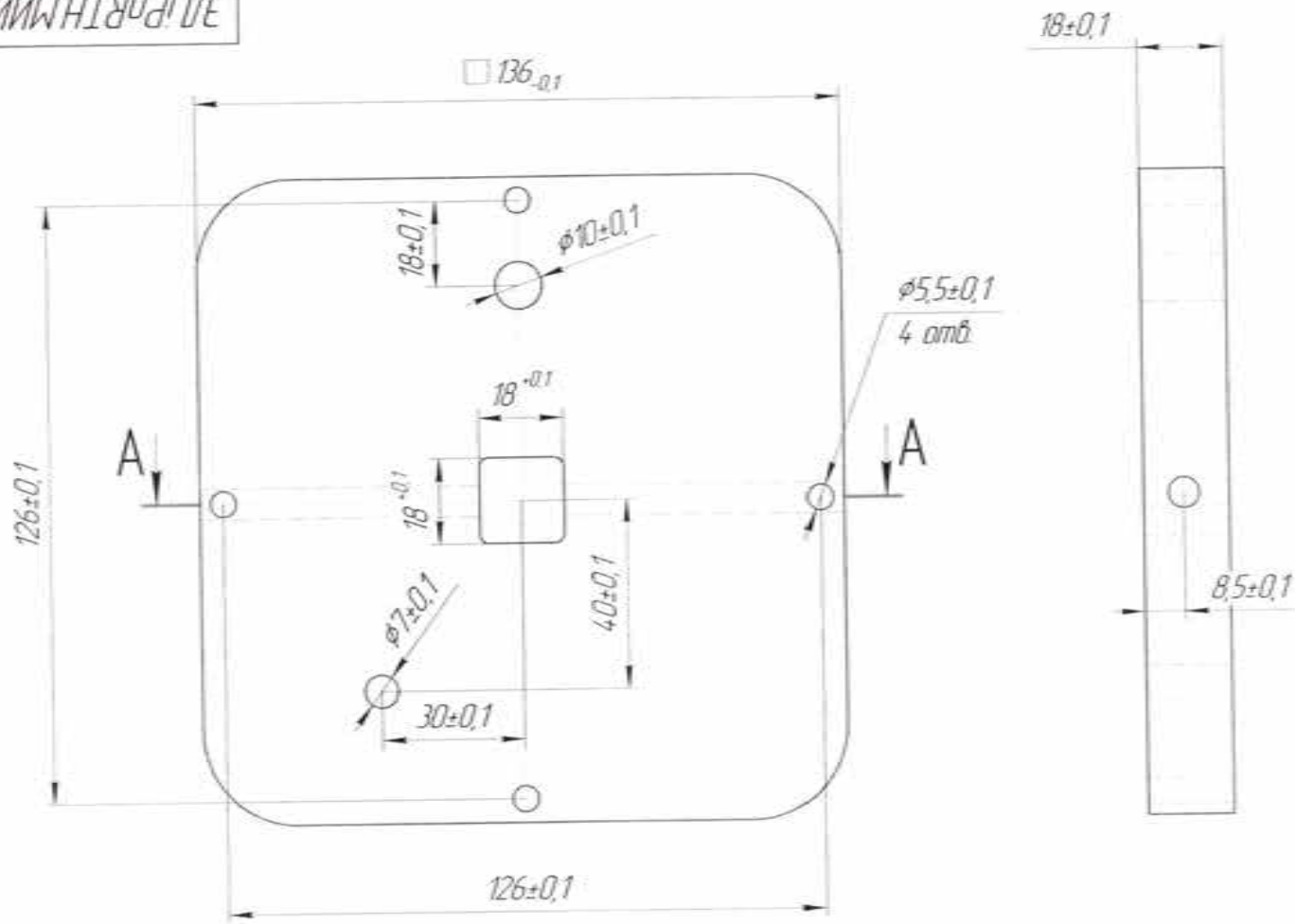
1. \*Размер для сборки

Лист №...  
Стр. №...  
Лист и дата...  
Лист №...  
Лист и дата...  
Лист №...  
Лист и дата...

				ЭД.РОРТН.МИИ.005			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Корпус верхний - блок 3	Лист	Масса	Масштаб
Разработ	Мелекесова	А.С.	2013				1:1
Проб	Решетов	Р.С.	2013		Лист	Листов	1
Инженер				Д16 ГОСТ 4784-97	ФГБНУ ТИСЧУМ		
Млад	Сарьяков Исмаилов	В.С. И.С.	2013 2013				
				Конструктор	Формат А3		

ЭД.Р0РТН.ММ.006

3,2 ✓(✓)



A-A(1:1)

				ЭД.Р0РТН.ММ.006			
Изм/Лист	№ докум	Лист	Дата	Крышка верхняя	Лист	Масса	Максимум
Разработ	Мелекесова	С.И.	20.12.18				11
Проб	Решетов	Р.В.	20.12.18		Лист	Листов	1
Т.контр							
Начерт	Согрин	С.В.	20.12.18	Д16 ГОСТ 4784-97	ФГБНУ ТИСЧУМ		
Чит	Исина	И.В.	20.12.18	Копирован	Формат А1		

№ докум  
 Лист  
 Дата  
 Изм/Лист  
 № докум  
 Лист  
 Дата  
 Разработ  
 Мелекесова  
 С.И.  
 20.12.18  
 Проб  
 Решетов  
 Р.В.  
 20.12.18  
 Т.контр  
 Начерт  
 Согрин  
 С.В.  
 20.12.18  
 Чит  
 Исина  
 И.В.  
 20.12.18

ЭД.РОРТН.МИИ.007

Листов: 1

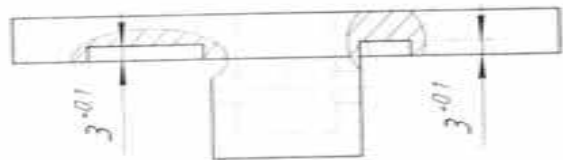
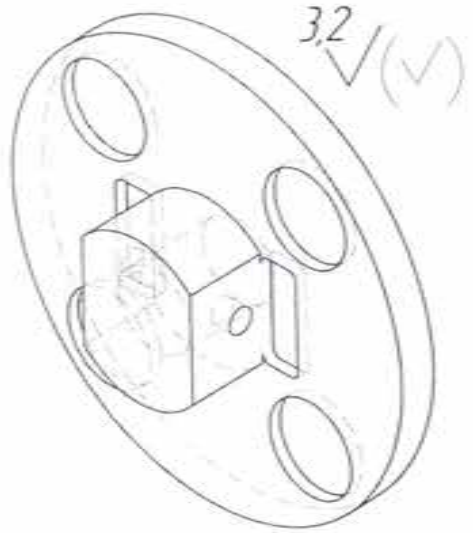
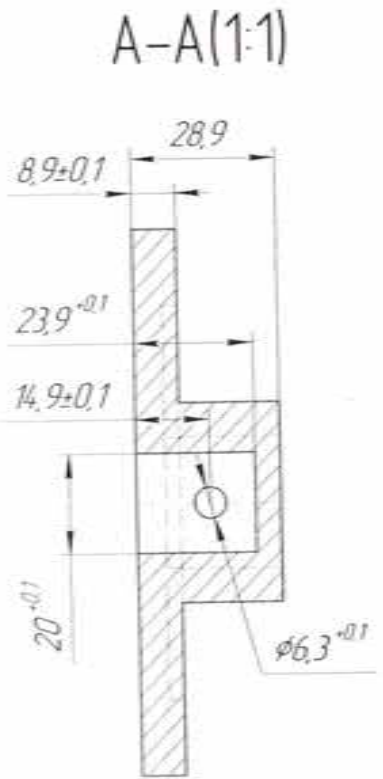
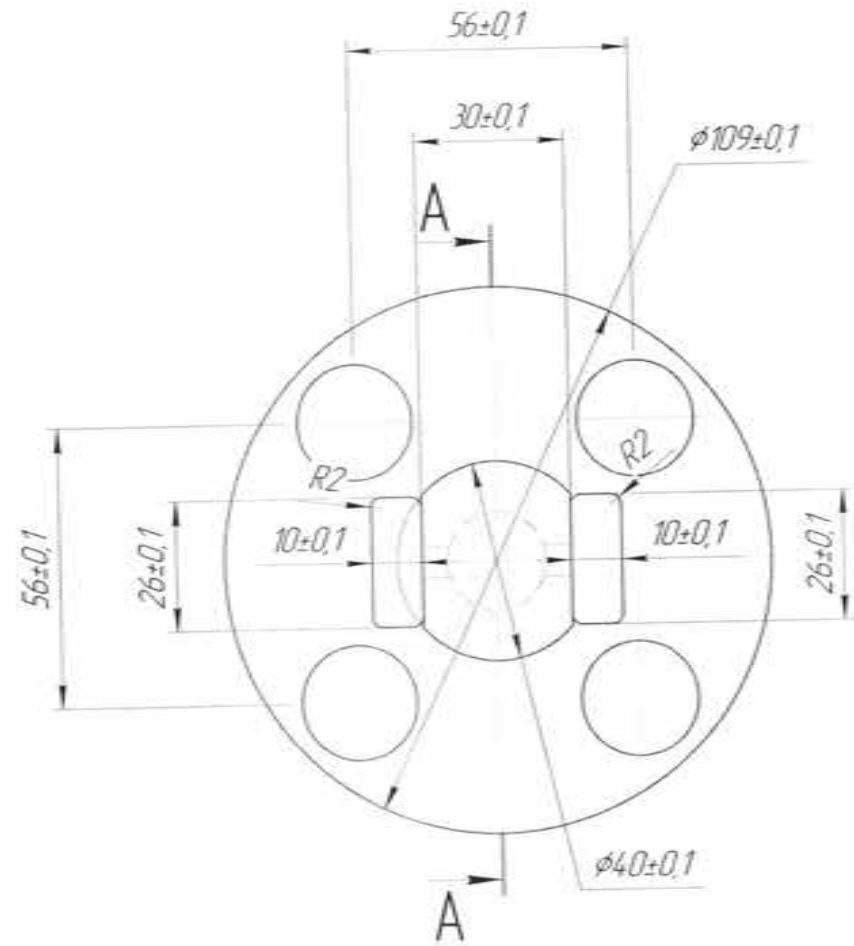
Сторона: А

Лист и дата:

Взам. инв. №, инв. № докум. Лист и дата:

Лист и дата:

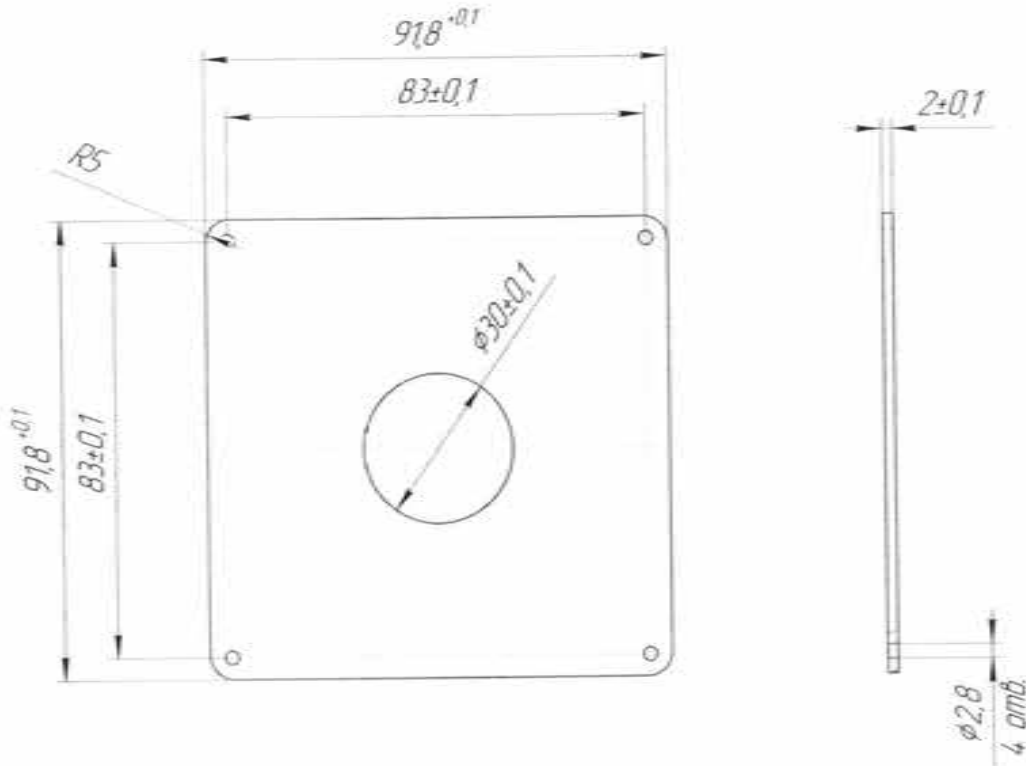
Инв. № подл.



ЭД.РОРТН.МИИ.007				Лист	Масса	Максимум
Изм./лист	№ докум.	Подп.	Дата			11
Разраб	Мелекисаба	Р.С.М.	6.11.12			
Проб	Решетов	Р.С.М.	11.11.12			
Контр						
Исполн	Саврикин	Е.С.М.	11.11.12			
Удп	Усманов	Е.С.М.	11.11.12			
Д16 ГОСТ 4784-97				Лист	Листов	1
Калибратор				ФГБНУ ТИСНУМ		
				Формат А3		

ЭД.РОРТН.МИИ.008

3,2 ✓(✓)



1 \*Размер для сборки

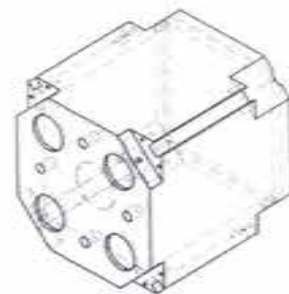
Изд. № подл. Пашн и дата. Взам. инв. №. Инв. № дробл. Пашн и дата. Склад №. Изм. примен.

				ЭД.РОРТН.МИИ.008			
Изм/Лист	№ докум.	Лист	Дата	Крышка прижимающая	Лист	Масса	Максимум
Разраб	Мележко	Д.И.С.	10.01.17				11
Проб	Решетов	Р.В.А.	11.11.17		Лист	Листов	1
Исполн	Согрыкин	Е.В.С.	11.11.17	Д16 ГОСТ 4784-97		ФГБНУ ТИСЧУМ	
Чит	Исачин	И.В.С.	11.11.17	Копирован		Формат А3	

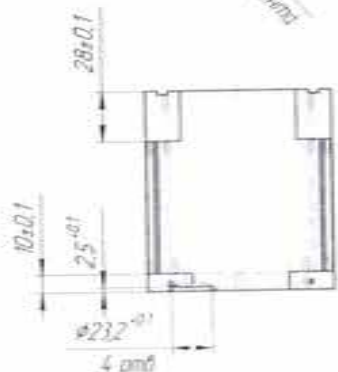
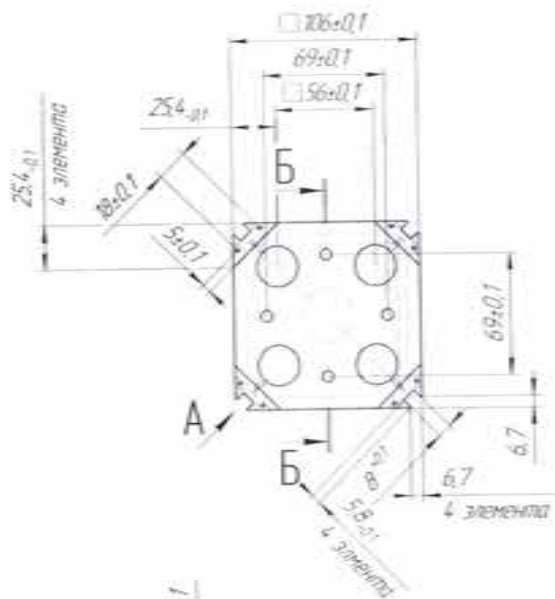
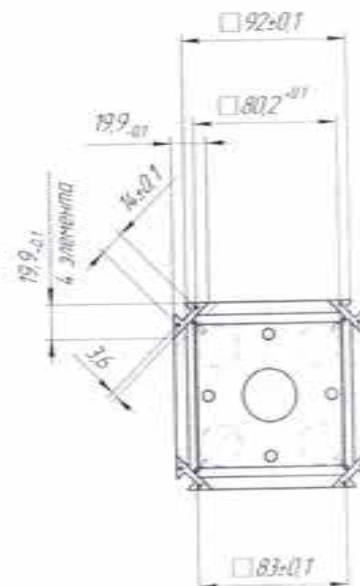
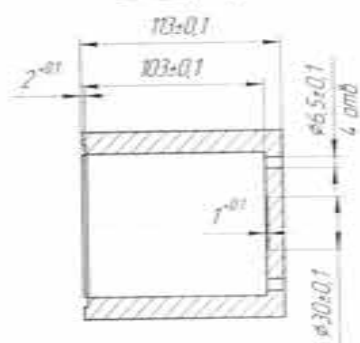
ЭД.Р.07НММ.009

32 ✓(✓)

А1:2



Б-Б(1:2)



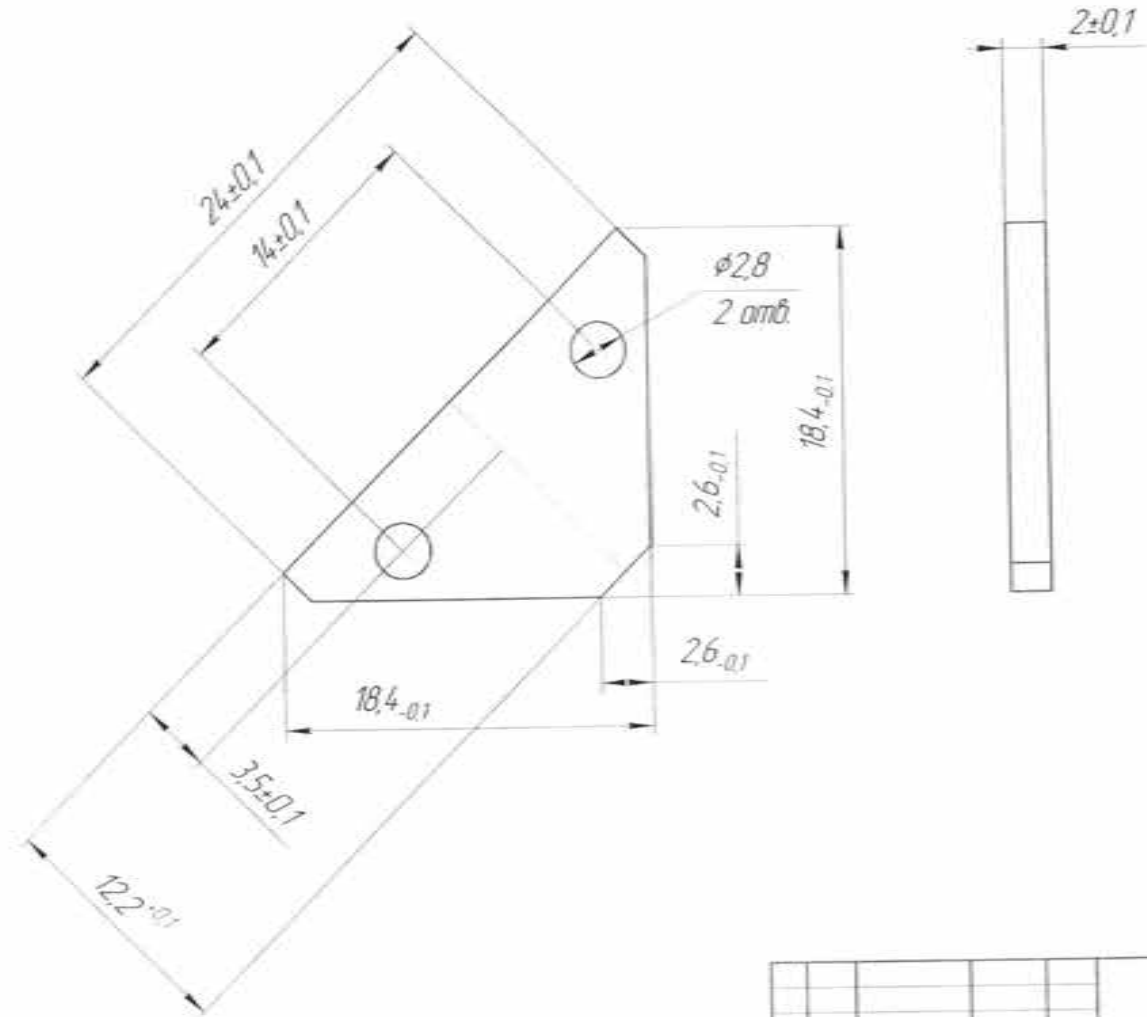
ЭД.Р.07НММ.009						Лист	Измен.	Исполн.
Изм.	Внес.	№ докум.	Дата	Внес.	Дата	Корпус внутренний		
1						12		
Д16 ГОСТ 4784-97						ФГБНУ ТИСКУМ		
Корпус						Корпус		

Корпус

Лист 12

ЭД.РОРТН.МВИ.010

3,2 ✓(✓)



Перв. примен

Станд. №

Полн. и дата

Изм. № дата

Взам. шта. №

Полн. и дата

Изм. № год

				ЭД.РОРТН.МВИ.010			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Пластина-фиксатор	Лист	Масса	Масштаб
Разработ	Мелекесова	С.М.	20.12				4:1
Проб.	Решетов	Р.С.	20.12		Лист	Листов	1
Исполн.	Сарыжан	С.С.	20.12	Д16 ГОСТ 4784-97	ФГБНУ ТИСЧУМ		
Удобр.	Угенин	У.У.	20.12	Копировать	Формат А3		

ЭД.РОРТН.МИИ.011

A(4:1)

$\phi 3.3 \pm 0.1$

$4.5 \pm 0.1$

$31.4 \pm 0.1$

$18 \pm 0.1$

$\phi 2.8 \pm 0.1$

2 отв.

$2 \pm 0.1$

$25 \pm 0.1$

$2.2 \pm 0.1$

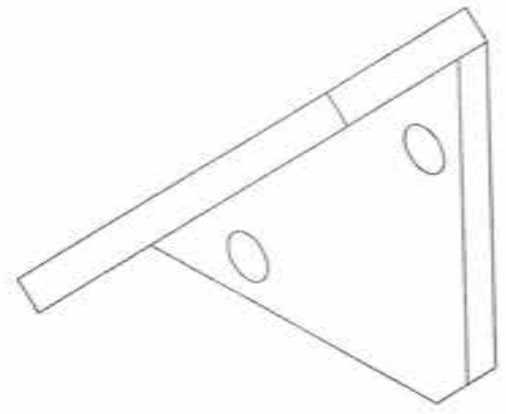
A

$10 \pm 0.1$

$5 \pm 0.1$

$22 \pm 0.1$

$25 \pm 0.1$



Лист №  
Разр. и дата  
Взам. инв. №  
Инв. № дубл.  
Лист № дубл.  
Разр. и дата  
Лист № дубл.

Исполн.	Провер.	Инж.	Инж.
Мельникова	Корова	Корова	Корова
Степанов	Корова	Корова	Корова
Степанов	Корова	Корова	Корова

ЭД.РОРТН.МИИ.011

Уголок-фиксатор

Д16 ГОСТ 4784-97

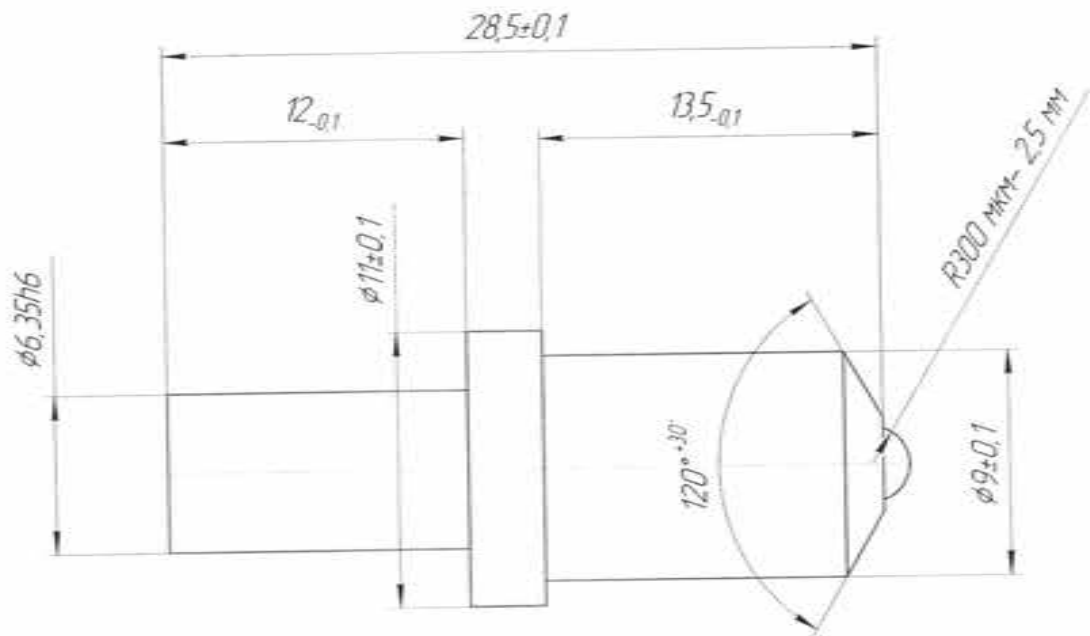
Лист	Масса	Масштаб
1		4:1
Лист	Листов	1
ФГБНУ ТИСНУМ		
Формат А3		

Коробов



3,2  
√(✓)

ЭД.Р.ОРТН.МИИ.000.01.001



№№ листов	Табл. и дата	Взам. инв. №	Инв. № докум.	Табл. и дата	Строч. №	Титр. таблица
-----------	--------------	--------------	---------------	--------------	----------	---------------

ЭД.Р.ОРТН.МИИ.000.01.001			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Разраб.	Мелекесова	И.И.	И.И.И.
Проб.	Решетов	Р.В.	И.И.И.
Технпр.			
Исполн.	Сарыжин	С.В.	И.И.И.
Удб.	Чеганов	И.И.	И.И.И.
Наконечник идентифицирующий			Лист
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72			Листов 1
ФГБНУ ТИСЧУМ			1

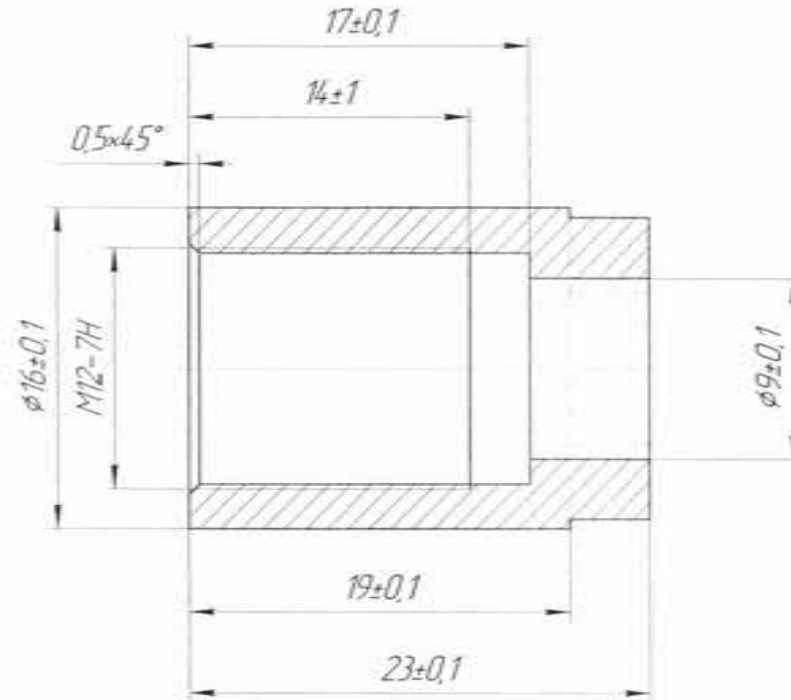
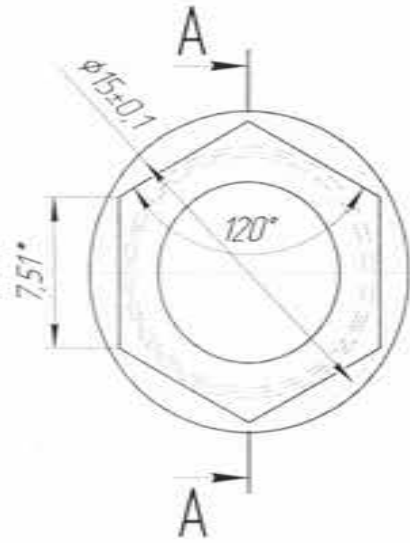
Копирован

Формат А3

ЭД.Р0РТН.МИИ.000.01.002

3,2√(✓)

A-A(4:1)



1 \*Размер для сборки

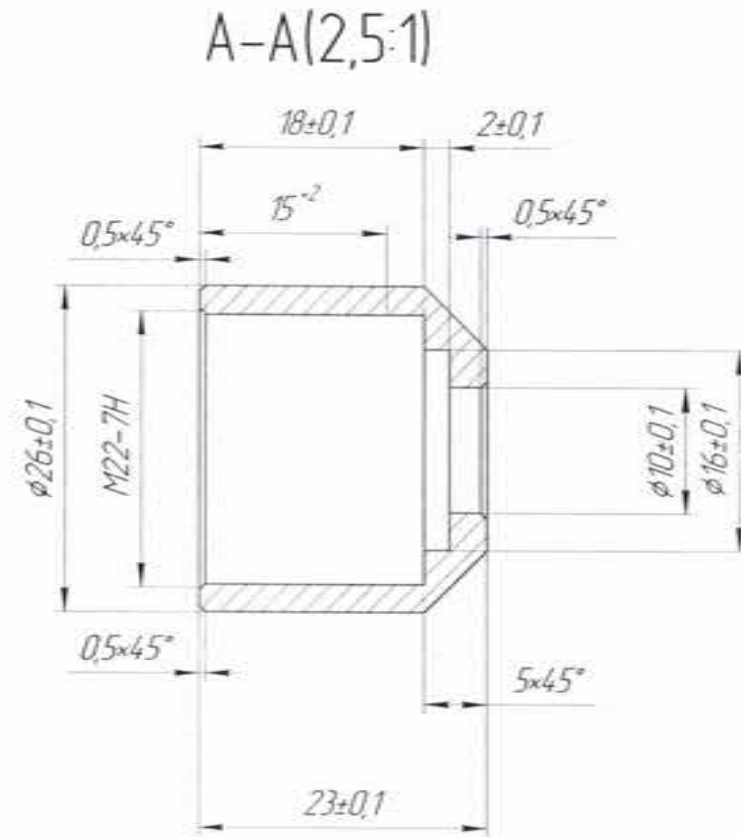
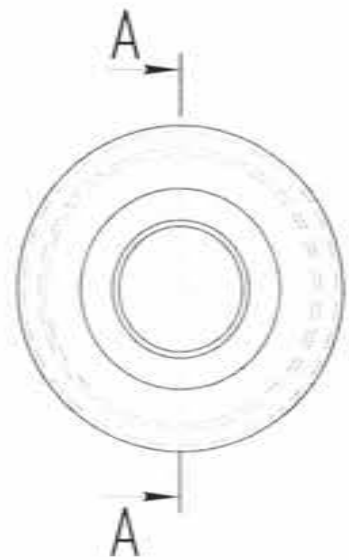
Лист 1 из 1  
 Дата: \_\_\_\_\_  
 Изм. № \_\_\_\_\_  
 Дата: \_\_\_\_\_  
 Изм. № \_\_\_\_\_  
 Дата: \_\_\_\_\_

				ЭД.Р0РТН.МИИ.000.01.002			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Гайка накладная	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Мельникова	И.И.	10.12				4:1
Проб.	Решетов	Р.В.	11.12		Лист	Листов	1
Т.контр.							
И.контр.	Согрыкин	С.В.	10.12	Сталь 40Х13 ГОСТ 5632-72	ФГБНУ ТИСНУМ		
Утв.	Чегина	И.И.	10.12	Копировал			

Формат А3

ЭД.Р0RTH.MИИ.000.01.003

3,2 ✓(✓)

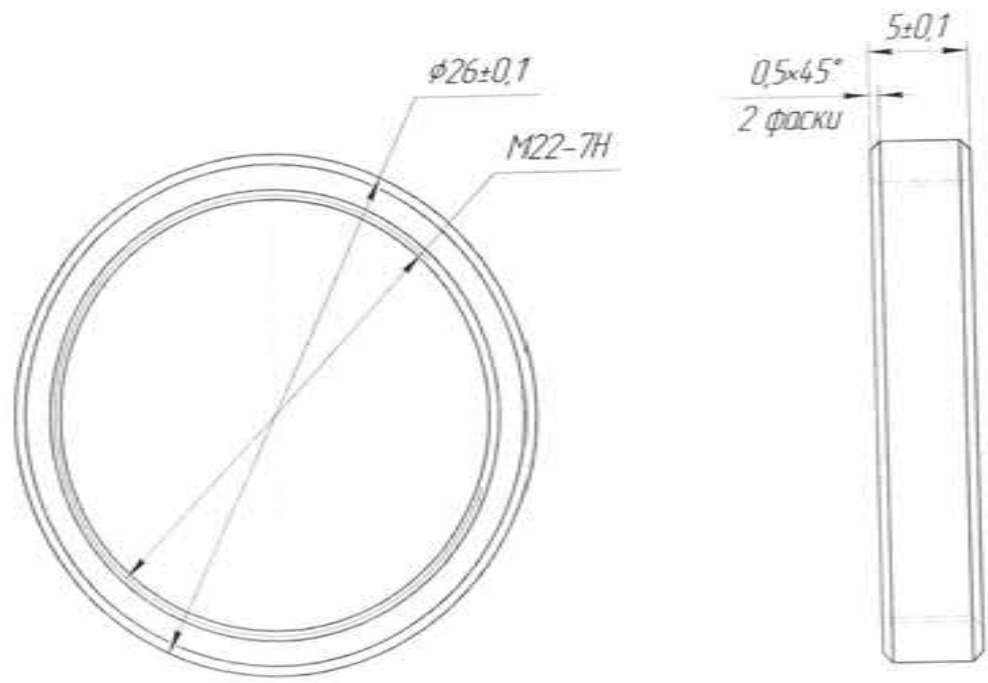


Лист № 1  
 Вид № 1  
 Изм. № 1  
 Дата  
 Вид № 1  
 Изм. № 1  
 Дата  
 Вид № 1  
 Изм. № 1  
 Дата

				ЭД.Р0RTH.MИИ.000.01.003			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Гайка упорная	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Мельникова	С.С.	2012				25:1
Проб.	Резинов	Р.Ф.	12.11.12		Лист	Листов	1
Исполн.	Согоркин	С.В.	12.11.12	Сталь 40X13 ГОСТ 5632-72	ФГБНУ ТИСЧУМ		
Чел.	Мельникова	С.С.	12.11.12	Копирован	Формат А3		

3,2 ✓ (✓)

ЭД.РОРТН.МИИ.000.01.004



Листов в сборе  
Стр. №  
Лист в сборе  
Взам. инв. №  
Инв. № дубл.  
Лист в сборе  
Лист в сборе  
Инв. № дубл.

				ЭД.РОРТН.МИИ.000.01.004		
Изм./Лист	№ докум	Подп	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб	Мележесова	Л.С.	10.12			4:1
Проб	Рашетов	Р.В.	11.12	Лист	Листов	1
Т.контр						
Исполн	Сопрыкин	Е.В.	11.12	Сталь 40Х13 ГОСТ 5632-72		ФГБНУ ТИСЧУМ
Упр	Чеснов	И.И.	11.12	Контроль		Формат А3

ЭД.Р0РТН.МИИ.000.01.005

Год разработки

Стр. №

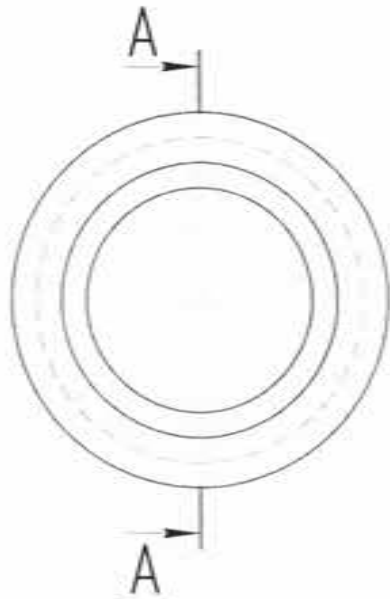
Год и дата

Изм. №

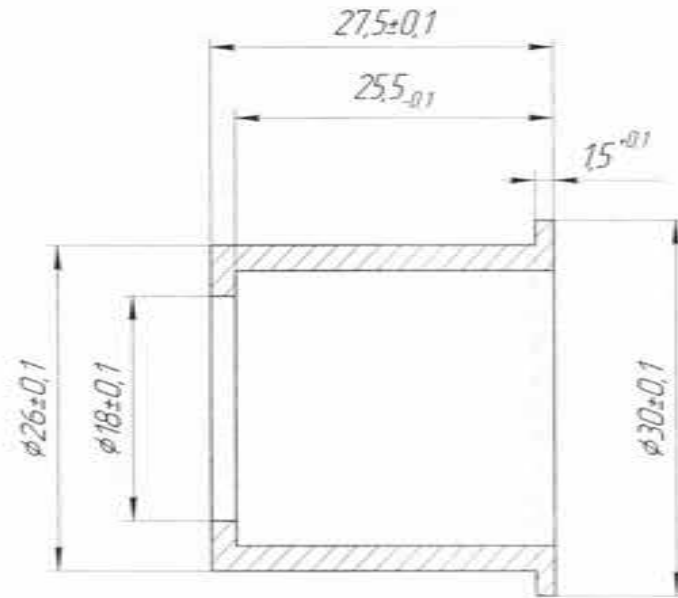
Изм. №

Год и дата

Изм. №



A-A(2,5:1)



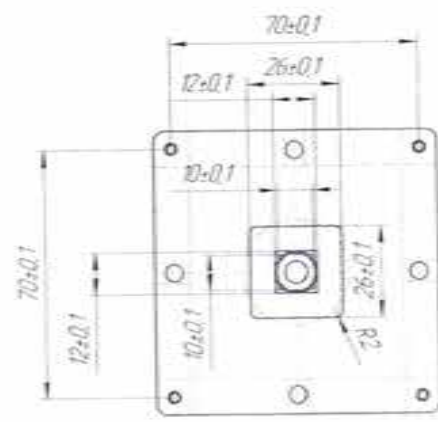
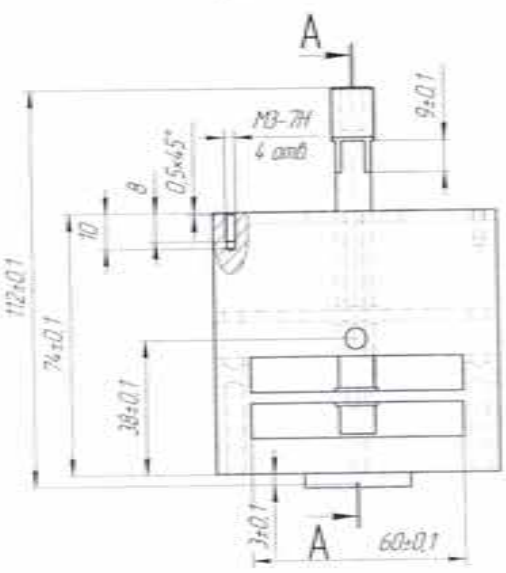
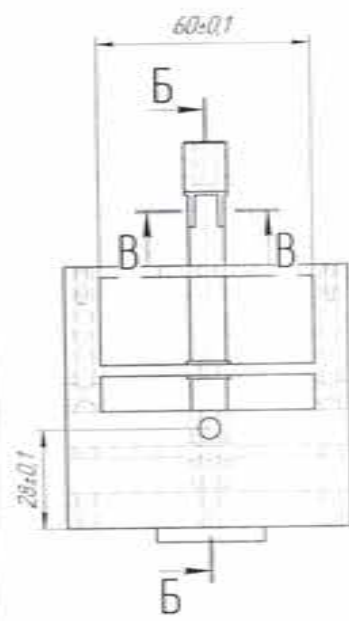
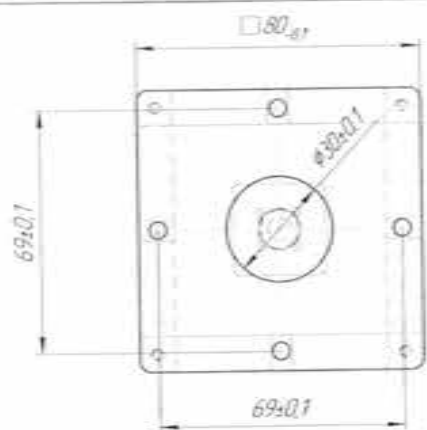
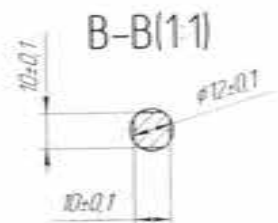
ЭД.Р0РТН.МИИ.000.01.005

Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Мелекесова	М.С.Р.	10.11.12			2,5:1
Гр.об.	Решетов	К.С.В.	10.11.12			
Т.контр.				Лист	Листов	1
Исполн.	Сарыжан	С.С.С.	10.11.12	Д16 ГОСТ 4784-97		ФГБНУ ТИСЧУМ
Упр.	Чегинев	С.С.С.	10.11.12	Копирбат		Формат А3

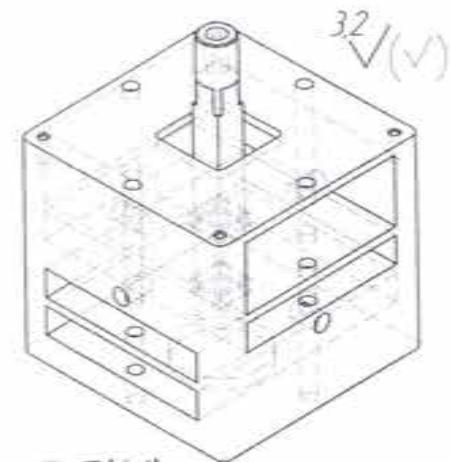
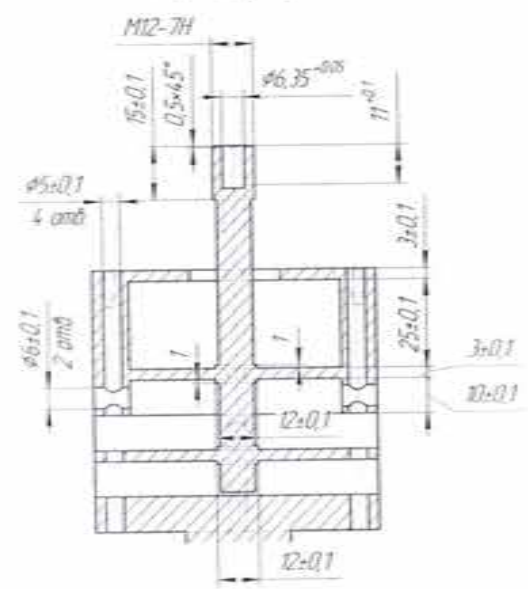
Копирбат

Формат А3

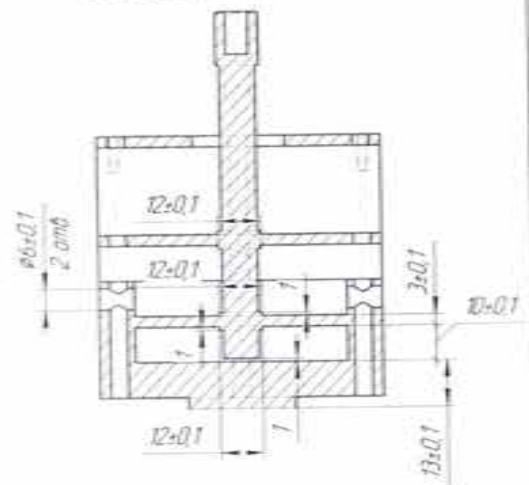
ЭД.РФ.РТИ.М.ИИ.000.01.01.001



A-A(11)



Б-Б(11)

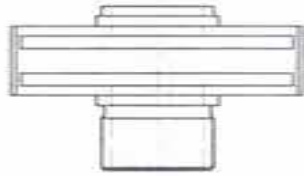


ЭД.РФ.РТИ.М.ИИ.000.01.01.001				Корпус датчика силы		Лист 1	Измен.	11
№ документа	№ документа	Исполнитель	Проверенный	Дата	Исполнитель	Лист	Измен.	1
Исполнитель	Проверенный	Дата	Исполнитель	Дата	Исполнитель	Лист	Измен.	1
Д16 ГОСТ 4.784-97						ФГБУН ТИИСУМ		

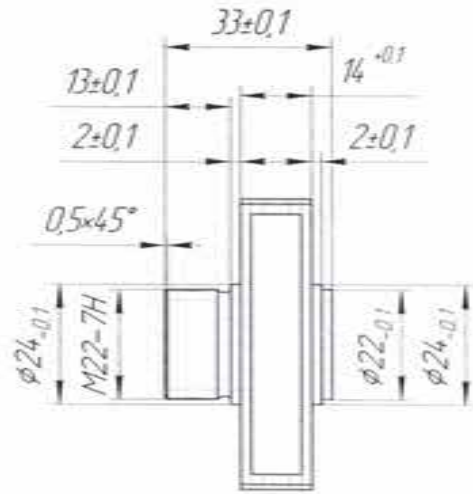
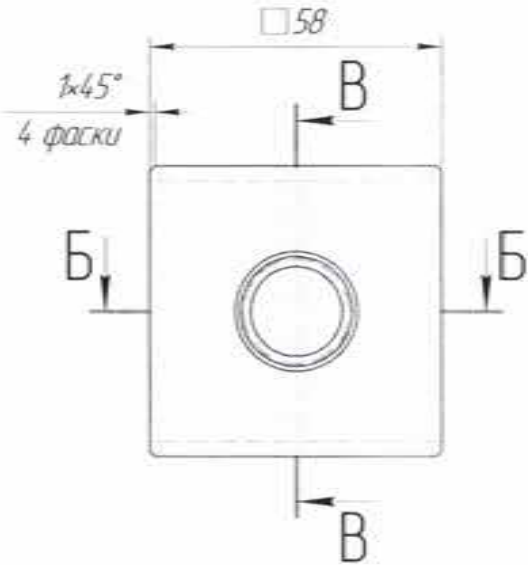
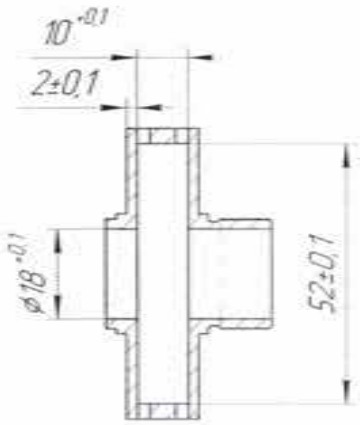
Имя файла: ЭД.РФ.РТИ.М.ИИ.000.01.01.001  
 Имя папки: ЭД.РФ.РТИ.М.ИИ.000.01.01.001  
 Имя документа: ЭД.РФ.РТИ.М.ИИ.000.01.01.001

ЭД.Р.ОРТН.МИИ.000.01.02.001

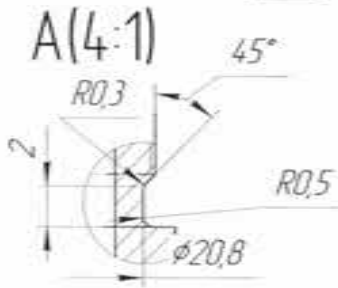
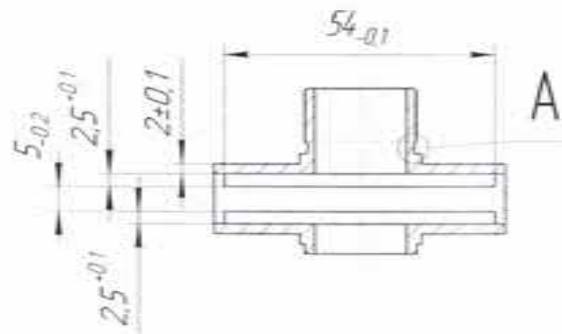
3,2 ✓(✓)



В-В(1:1)



Б-Б(1:1)

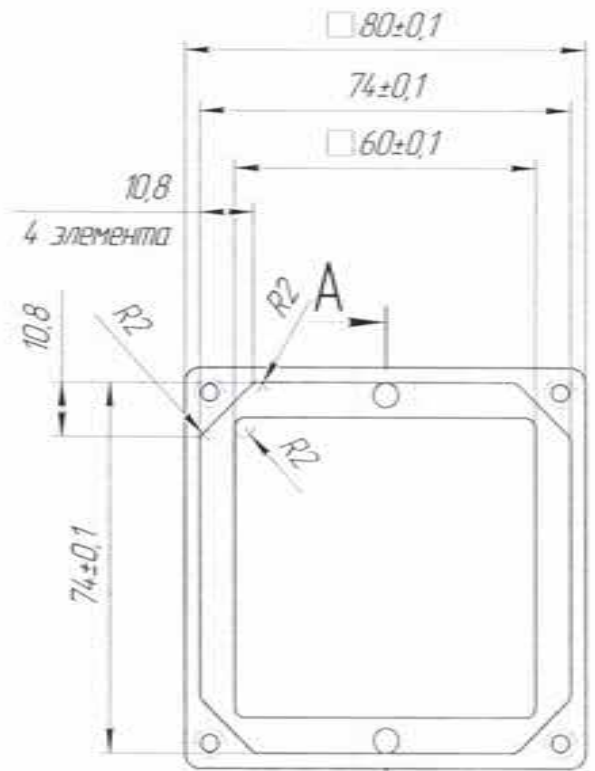


№№ № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № дата	Подп. и дата	Лист

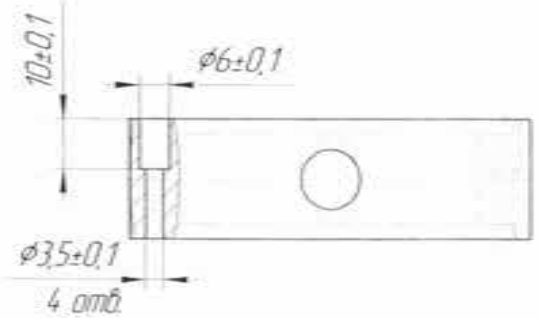
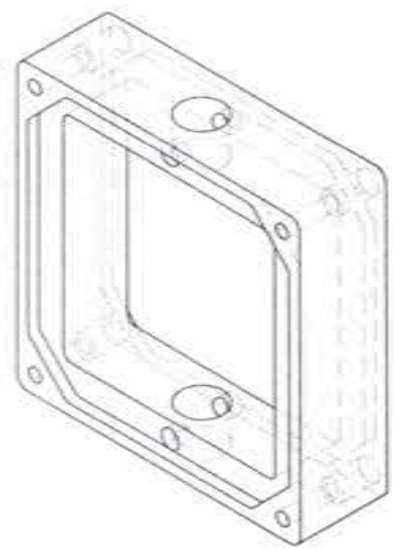
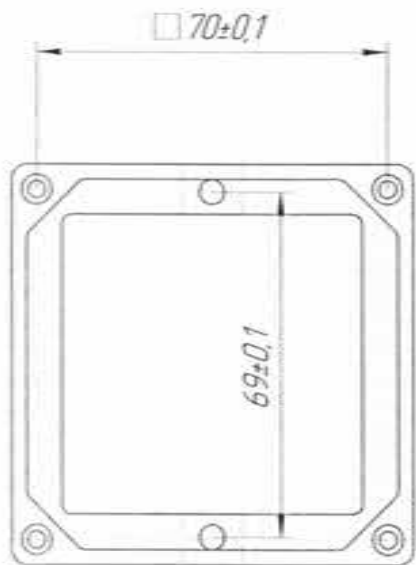
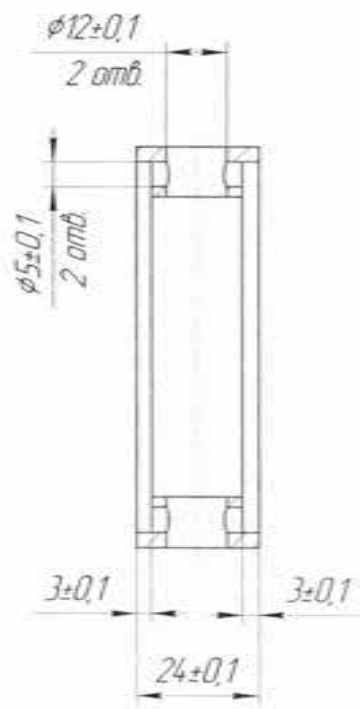
ЭД.Р.ОРТН.МИИ.000.01.02.001				Лист	Масса	Масштаб
Корпус датчика перемещения						1:1
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист / Листов 1		
Разраб.	Мелекесова	С.А.	10.12			
Проб.	Решетов	Р.В.	10.12			
Т.контр.						
Исполн.	Сарыкин	С.В.	10.12	Д16 ГОСТ 4784-97		
Чел.	Исмаилов	И.В.	10.12	ФГБНУ ТИСЧУМ		

ЭД.РОРТН.МИИ.000.0102.004

3.2 ✓(✓)



A-A(1:1)



ЭД.РОРТН.МИИ.000.0102.004				Лист	Масса	Масштаб
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Корпус мембран		11
Разраб.	Менделеева	М.С.	10.11.14	Лист	Листов 1	
Проб.	Решетов	К.С.	10.11.14			
Инженер						
Начальник цеха	Согринин	Е.В.	10.11.14	Д16 ГОСТ 4784-97		ФГБНУ ТИСНУМ
Менеджер	Мельников	М.В.	10.11.14	Копировать		Формат А3

Лист 1 из 1  
Сторона №  
Лист в сборе  
Вариант №  
Лист № докум.  
Лист в сборе  
Лист № докум.



ЭД.Р08РТН.МММ.000.01.02.005

Лист 1 из 1

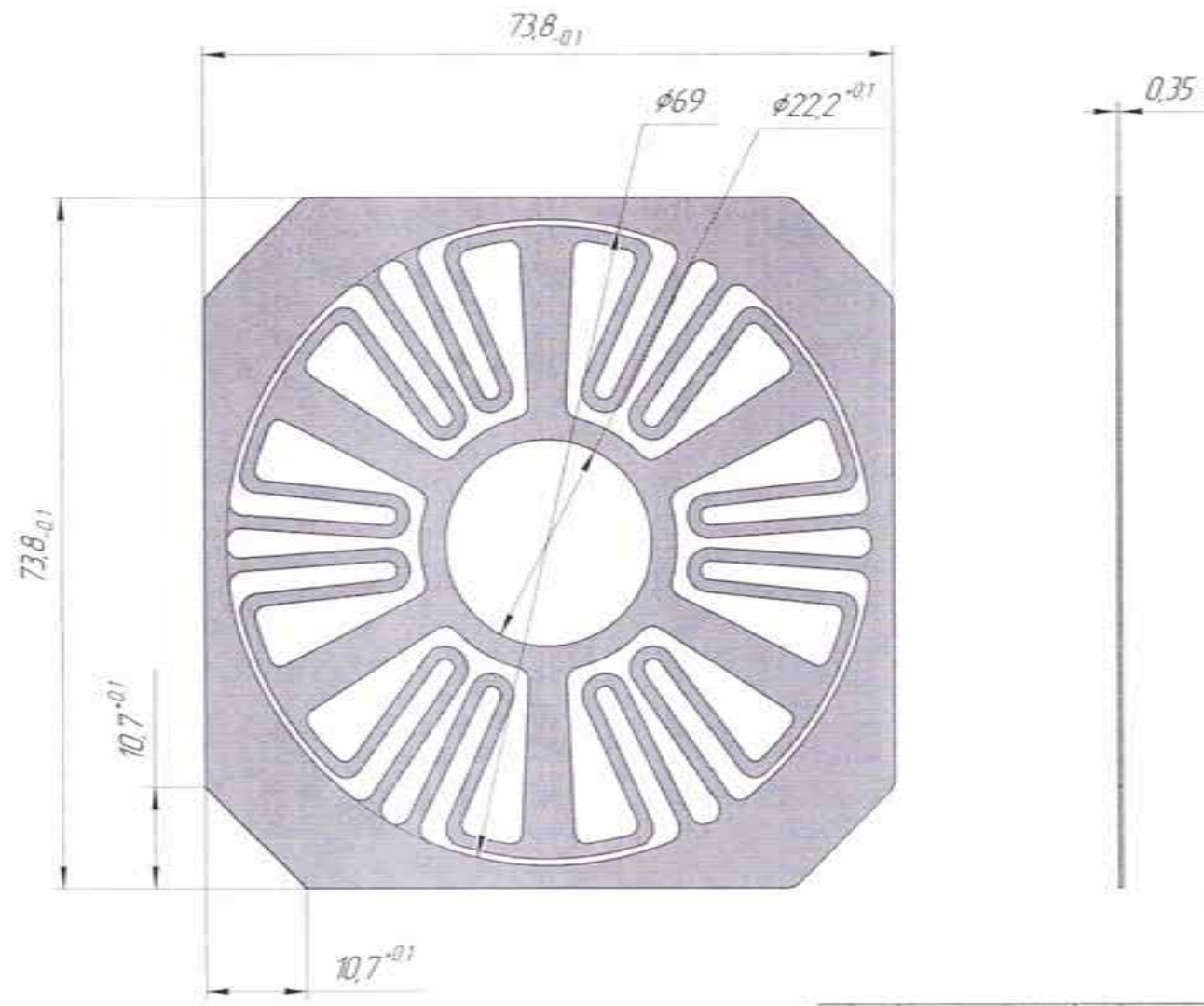
Стр. №

Полн. и дата

Взам. инв. № Инв. № дубл.

Полн. и дата

Инв. № подл.



ЭД.Р08РТН.МММ.000.01.02.005			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разработ	Мембраны	С.В.С.	15.12
Проб.	Решетов	В.В.	15.12
Техник			
Исполн.	Сарьян	С.В.	15.12
Удп.	Железов	М.В.	16.12
Мембрана			Лист 1 из 1
Сплав 36НХТ0 ГОСТ 10994-74			ФГБНУ ТИСЧУМ

Конструктор

Формат А3

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА  
ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTN

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБНУ

ТИСНУМ

В.Д.

Бланк

« 7 » декабря 2017 г.



**Акт изготовления объектов испытаний**

макет индентационного измерительного модуля экспериментального образца  
портативного роботизированного твердомера (iPoRTH)  
по Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года  
№ 14.577.21.0274  
Шифр 2017-14-579-0057

« 7 » декабря 2017 г.

г. Москва,

г. Троицк

Комиссия в составе:

председателя	Первого заместителя директора по научной работе	В.М. Прохорова
членов комиссии	заведующего отделом	А.С. Усеинова
	заведующего отделом	С.А. Перфилова
	ведущего инженера-экономиста	Е.Е. Сапрыкина,

назначенная приказом по ФГБНУ ТИСНУМ от 23 апреля 2015 г. № 28-о,  
составила настоящий акт о нижеследующем:

**1. Комиссии предъявлены:**

1.1 Макет индентационного измерительного модуля экспериментального образца портативного роботизированного твердомера (iPoRTH) в количестве 1 шт.

1.2 Конструкторская документация на макет индентационного измерительного модуля экспериментального образца портативного роботизированного твердомера в составе:

- Схема деления структурная ЭД.iPoRTH.000 E1;
- Схема деления структурная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 E1;
- Чертеж общего вида ЭД.iPoRTH.МИИ.000 BO;
- Схема электрическая функциональная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 Э2;
- Перечень элементов схемы электрической функциональной ЭД.iPoRTH.МИИ.000 ПЭ Э2;
- Схема электрическая соединений и подключения объединенная ЭД.iPoRTH.МИИ.000 Э0;
- Чертеж Корпус нижний ЭД.iPoRTH.МИИ.001;
- Чертеж Пластина-ограничитель ЭД.iPoRTH.МИИ.002;
- Чертеж Корпус верхний-блок 1 ЭД.iPoRTH.МИИ.003;
- Чертеж Корпус верхний-блок 2 ЭД.iPoRTH.МИИ.004;
- Чертеж Корпус верхний-блок 3 ЭД.iPoRTH.МИИ.005;
- Чертеж Крышка верхняя ЭД.iPoRTH.МИИ.006;
- Чертеж Пластина подвижная ЭД.iPoRTH.МИИ.007;
- Чертеж Крышка прижимающая ЭД.iPoRTH.МИИ.008;
- Чертеж Корпус внутренний ЭД.iPoRTH.МИИ.009;
- Чертеж Пластина-фиксатор ЭД.iPoRTH.МИИ.010;
- Чертеж Уголок-фиксатор ЭД.iPoRTH.МИИ.МИИ.011;
- Чертеж Наконечник индентирующий ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.001;
- Чертеж Гайка накидная ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.002;
- Чертеж Гайка упорная ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.003;
- Чертеж Контрогайка ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.004;
- Чертеж стакан ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.005;

- Чертеж Корпус датчика силы ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.01.001;
- Чертеж Корпус датчика перемещения ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.001;
- Чертеж Корпус мембран ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.004;
- Чертеж Мембрана ЭД.iPoRTH.МИИ.000.01.02.005.

## 2. В результате проверки установлено:

2.1. Объект испытаний изготовлен ФГБНУ ТИСЧУМ в период с 13 ноября 2017 г. по 6 декабря 2017 г. в соответствии с документацией на объект испытаний (см. комплект чертежей по п.1.2) в комплектности, установленной техническим заданием.

## 3. Вывод

Объект испытаний пригоден для проведения исследовательских испытаний.

Председатель

Члены комиссии



В.М. Прохоров

А.С. Усеинов

С.А. Перфилов

Е.Е. Сапрыкин

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
МОДУЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTN

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБНУ ТИСНУМ



В.Д. Бланк

« 01 » декабря 2017 г.

**ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ  
МАКЕТА ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTN**

RU. ЭОПРТ.00001-01 17 01 ПМ

Начальник                    отдела  
исследования                физико-  
механических свойств

А.С.Усеинов

Главный конструктор

А.В.Рассказчиков

Главный метролог

В.В. Соловьев

Научный сотрудник

С.Л. Мелекесова

г. Москва, г. Троицк – 2017

Условные обозначения и сокращения, принятые в тексте

МИИМ Макет индентационного измерительного модуля iPoRTH

ТЗ Техническое задание

ПМ Программа и методика испытаний

1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний).

Макет индентационного измерительного модуля iPoRTH (далее по тексту – МИИМ)

1.2 Цель испытаний: подтверждение соответствия характеристик объекта всем требованиям, заданным ТЗ, в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации (применения, использования).

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания

1.3.1 Объект испытаний предъявляется на испытания в следующей комплектности:

- объект испытаний;
- упаковка;

1.3.2 Объект испытаний предъявляется на испытания в следующем составе и в сопровождении следующих документов:

- индентационный измерительный модуль, оснащенный соединительными кабелями;

- техническое задание по Соглашению 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии для финансового обеспечения затрат, связанных с выполнением прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по лоту шифр 2017-14-579-0057 по теме: «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в

машиностроительной и атомной отраслях» (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0274);

- настоящая ПМ;
- акт изготовления объекта.

2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

### 2.1 Место проведения испытаний

Испытания проводятся на базе ФГБНУ ТИСНУМ в Отделе исследований физико-механических свойств, г.Москва, г.Троицк, ул.Центральная, 7а

### 2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Перечень средств проведения испытаний приведён в приложении А.

2.2.2 Средства измерений, указанные в приложении А, могут быть заменены аналогами, обладающими схожими метрологическими характеристиками.

### 2.3 Требования к условиям проведения испытаний:

Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях:

температура окружающего воздуха, °С	23±2
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 85
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 720 до 790

### 2.4 Требования к подготовке изделия к испытаниям

К началу испытаний изготовитель представляет «Акт технической готовности объекта испытаний к исследовательским испытаниям».

## 3 Требования безопасности

### Требования безопасности при проведении испытаний

При проведении испытаний должны быть соблюдены требования ГОСТ 12.3.019-80. Освещенность рабочего места должна соответствовать требованиям санитарных правил СП 2.2.1.1312-03.



#### 4 Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Пункт методики
4.1	Обеспечение возможности функционирования МИИМ, будучи установленным на произвольную систему позиционирования, обеспечивающую подвод измерительного индентора с точностью не менее 1 мм на расстояние не более 5 мм к исследуемой поверхности	4.2.3		соответствие	6.1
4.2	Индентационный измерительный модуль должен обеспечивать установки сферообразных наконечников (сфероконических или иных) для проведения измерений путем вдавливания, в том числе наконечников с радиусом кривизны кончика от 300 мкм до 2,5 мм	4.3.1.2.2 4.3.1.3.2		обеспечение	6.2
4.3	Измеряемый диапазон прикладываемой нагрузки Р на поверхность образца в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация, не менее	4.3.1.3.5	Н	3000	6.3
4.4	Измеряемый диапазон погружения индентирующего наконечника d в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация в зависимости от механических свойств исследуемого материала и толщины покрытия, не менее	4.3.1.3.7	мм	1	6.4
4.5	Вес МИИМ, не более	4.3.1.3.10	кг	15	6.5
4.6	Жесткость пружинного блока k, образованного внутренним корпусом и подвижной пластинки с пружинами, должна являться постоянной с точностью 5% величиной в диапазоне от 250 Н/мм до 300 Н/мм, в условиях приложения максимальной нагрузки 3000 Н	-	Н/мм	$250 \leq k \leq 300$	6.6
4.7	Погрешность среднего значения жесткости пружинного блока должна составлять не более 5%	-	%	$\leq 5$	6.7
4.8	Жесткость корпуса датчика силы k должна являться постоянной с точностью 5% величиной в диапазоне от 2700 Н/мм до 3300 Н/мм, в условиях приложения максимальной нагрузки 3000 Н	4.3.1.3.5	Н/мм	$250 \leq k \leq 300$	6.8
4.9	Погрешность среднего значения жесткости пружинного блока должна составлять не более 5%	-	%	$\leq 5$	6.9

## 5 Режимы испытаний

### 5.1 Порядок испытаний.

Контроль полноты, достоверности и объективности хода и результатов исследовательских испытаний, полноты информации, соблюдения сроков испытаний и документальное оформление их результатов осуществляет комиссия, назначаемая приказом руководителя организации-исполнителя. Испытания проводятся в соответствии с планом-графиком, утверждаемым директором ФГБНУ ТИСНУМ. Последовательность проведения испытаний может быть изменена по решению комиссии.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдельных режимах испытаний:

Испытания прекращаются в случаях:

- несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;
- возникновения аварийных ситуаций.

5.3 Условия перерыва, аннулирования и возобновления испытаний на всех или на отдельных режимах, необходимость, условия и порядок перерыва, аннулирования или прекращения испытаний определяется комиссией.

## 6 Методы испытаний

6.1 Проверка по п. 4.1 Программы выполняется следующим образом:

Используя четыре полых цилиндра высотой 5мм закрепить макет индентационного измерительного модуля на металлической пластине при помощи винтов;

Используя лабораторный источник двуполярного напряжения подать напряжение +1 В на атюатор МИИМ;

Увеличивать напряжение с шагом 1 В, но не более чем до 24 В, пока шток не придет в движение, установить рабочее напряжение гарантирующее равномерное движение штока и наблюдать за движением индентора до тех пор, пока шток не коснется поверхности;

Понизить напряжение источника питания до 1 В и зафиксировать факт касания визуально. После этого изменить полярность подаваемого на актюатор МИИМ напряжения и осуществить отвод индентационного наконечника от поверхности.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если визуально зафиксирован контакт наконечника с поверхностью в соответствии с требованиями п. 4.1 Программы.

6.2 Проверка по п. 4.2 Программы выполняется следующим образом:

Последовательно закрепить в МИИМ держатели сферических наконечников диаметрами 2,5 мм; 1 мм; 300 мкм, соответственно;

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если наконечники с диаметрами 2,5 мм; 1 мм; 300 мкм были закреплены в держателе МИИМ в соответствии с требованиями п. 4.2 Программы.

6.3 Проверка по п. 4.3 Программы выполняется следующим образом:

Закрепить экспериментальный образец МИИМ в держателях Машины испытательной Instron 5982 в соответствии с руководством по эксплуатации;

Включить режим измерения нагрузки с помощью тензометров испытательной машины и перевести ответную часть испытательной машины в контакт с индентационным наконечником;

Используя лабораторный источник напряжения подать на актюатор МИИМ напряжение 1 В;

Увеличивать подаваемое на атюатор МИИМ напряжение до тех пор, пока тензометр испытательной машины не зафиксирует нагрузку 3000 Н.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если с помощью тензометра машины испытательной была зафиксирована нагрузка 3000 Н, в соответствии с требованиями, приведенными в п. 4.3. Программы.

Поменяв полярность подаваемого на атюатор МИИМ напряжения осуществить снятие нагрузки с индентирующего модуля.

6.4 Проверка по п. 4.4 Программы выполняется следующим образом:

Подключить к емкостному датчику перемещения МИИМ плату емкостной регистрации перемещения, изготовленную КБ РАДАР;

Закрепить экспериментальный образец МИИМ в держателях Машины испытательной Instron 5982 в соответствии с руководством по эксплуатации;

С помощью системы перемещения испытательной машины задать сжатие образца на 1 мм;

Убедиться в том, что сигнал платы КБ РАДАР находится в рабочем диапазоне;

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если сигнал платы КБ РАДАР находится в рабочем диапазоне, что соответствует требованиям п.4.4 Программы.

6.5 Проверка по п. 4.5 Программы выполняется следующим образом:

Измерить вес экспериментального образца МИИМ путем прямого взвешивания на весах.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если его вес не превышает 15 кг, что соответствует требованиям п.4.5 Программы.

6.6 Проверка по п. 4.6 Программы выполняется следующим образом:

Отключить электропитание прибора, извлечь корпус внутренний, пластину подвижную и соединяющие их пружины. Закрепить блок, образованный данными деталями (деакселератор) в держателях Машины испытательной Instron 5982 в соответствии с руководством по эксплуатации;

Включить режим измерения нагрузки с помощью тензометров испытательной машины и привести ответную часть испытательной машины в контакт с пружинным блоком;

Перемещать ответную часть испытательной машины и регистрировать изменение нагрузки вплоть до значения больше или равного 3000Н.

Отводить ответную часть испытательной машины и регистрировать изменение нагрузки вплоть до тех пор пока не будет потерян контакт с пружинным блоком. В процессе уменьшения нагрузки должно быть зарегистрировано не менее 5 пар значений нагрузка – перемещение.

По полученным данным нагрузка – перемещение вычислить среднее значение жесткости и его погрешность.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если среднее значение жесткости  $k$  составило постоянную величину в диапазоне от 250Н/мм до 300Н/мм, в соответствии с требованиями, приведенными в п. 4.6. Программы.

6.7 Проверка по п. 4.8 Программы выполняется следующим образом:

На основе данных, полученных в пункте 6.6 Методики испытаний вычисляют погрешность определения жесткости  $k$ .

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если погрешность среднего значения жесткости  $k$  составило не более 5% в соответствии с требованиями, приведенными в п. 4.6. Программы.

6.8 Проверка по п. 4.8 Программы выполняется следующим образом:

Закрепить силовочувствительный модуль в держателях Машины испытательной Instron 5982 в соответствии с руководством по эксплуатации;

Включить режим измерения нагрузки с помощью тензометров испытательной машины и привести ответную часть испытательной машины в контакт с силовочувствительным модулем;

Перемещать ответную часть испытательной машины и регистрировать изменение нагрузки вплоть до значения больше или равного 3000Н. В процессе увеличения нагрузки должно быть зарегистрировано не менее 5 пар значений нагрузка – перемещение.

Отвести ответную часть испытательной машины и регистрировать изменение нагрузки вплоть до тех пор пока не будет потерян контакт с силовочувствительным модулем. В процессе уменьшения нагрузки должно быть зарегистрировано не менее 5 пар значений нагрузка – перемещение.

По полученным данным нагрузка – перемещение вычислить среднее значение жесткости и его погрешность.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если среднее значение жесткости  $k$  составило постоянную величину в диапазоне от

2700Н/мм до 3300Н/мм, с погрешностью не более 5% в соответствии с требованиями, приведенными в п. 4.8. Программы.

6.9 Проверка по п. 4.9 Программы выполняется следующим образом:

На основе данных, полученных в пункте 6.8 Методики испытаний вычисляют погрешность определения жесткости  $k$ .

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если погрешность среднего значения жесткости  $k$  составило не более 5% в соответствии с требованиями, приведенными в п. 4.9. Программы.

## 7. Отчетность

7.1 Заданные и фактические данные, полученные при испытаниях по каждому пункту программы, оформляются протоколами, представляемыми на заседание комиссии. Типовая форма протокола испытаний приведена в приложении В. В согласованных случаях допускается оформлять одним протоколом данные, полученные при испытаниях по нескольким пунктам программы.

7.2 По результатам испытаний в течение 3 дней комиссией составляется акт испытаний. Акт испытаний должен содержать:

- подтверждение выполнения программы испытаний;
- оценку результатов испытаний с конкретными точными формулировками, отражающими соответствие объекта испытаний требованиям ТЗ;
- выводы по результатам испытаний;

К акту прилагаются протоколы испытаний по пунктам программы.

7.3 Первичные материалы испытаний хранятся на предприятии ФГБНУ ТИСНУМ в течение 5 лет со дня окончания испытаний.

## Приложения

Приложение ГА Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний

Приложение ГБ Типовая форма протокола испытаний

## Приложение ГА

### Перечень средств проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Машина испытательная Instron 5982	1	ГРСИ № 43602-10	Усилие 100 кН (22,500 фунтов силы) Испытательное пространство 1430 мм (56.3 дюйма) по вертикали Испытательное пространство 1930 мм (76 дюймов) по вертикали
Весы напольные	2	ГРСИ № 50315-12.	Наибольший предел взвешивания 20 кг Дискретность 2 г
Плата емкостной регистрации перемещения КБ РАДАР	1		Регистрация перемещения

Допускается применять другие средства, вновь разработанные или находящиеся в обращении, аналогичные по точности.

**Приложение ГБ  
ПРОТОКОЛ**

**испытания по пункту № 4.1.- 4.9.**

Программы и методики исследовательских испытаний макета индентационного  
измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH  
RU.ЭОПРТ.00001-01 17 01 ПМ

№ 1

«\_\_»\_\_\_\_\_ 201 г.

- 1. Объект испытания:** Экспериментальный образец, акт изготовления № \_\_ от «\_\_»\_\_\_\_\_ 201 г
- 2. Цель испытания:** проверка соответствия объекта испытания требованиям пункта № 4 технического задания: 4.2.3; 4.3.1.2.2; 4.3.1.3.5; 4.3.1.3.7; 4.3.1.3.10; 4.3.1.3.2
- 3. Дата начала испытания:** \_\_\_\_\_ 201 г
- 4. Дата окончания испытания:** \_\_\_\_\_ 201 г
- 5. Место проведения испытания:** г. Москва, г.Троицк, ул. Центральная, 7а, ФГБНУ ТИСНУМ, отдел исследования физико-механических свойств
- 6. Результаты испытания**

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
Обеспечение возможности функционирования МИИМ, будучи установленным на произвольную систему позиционирования, обеспечивающую подвод измерительного индентора с точностью не менее 1 мм на расстояние не более 5 мм к исследуемой поверхности	4.2.3	6.1		соответствие	
Индентационный измерительный модуль должен обеспечивать установки сферообразных наконечников (сфероконических или иных) для проведения измерений путем вдавливания, в том числе наконечников с радиусом кривизны кончика от 300 мкм до 2,5 мм	4.3.1.2.2 4.3.1.3.2	6.2		обеспечение	
Изменяемый диапазон прикладываемой нагрузки <i>P</i> на поверхность образца в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация, не менее	4.3.1.3.5	6.3	Н	3000	
Изменяемый диапазон погружения индентирующего наконечника <i>d</i> в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация в зависимости от механических свойств исследуемого материала и толщины покрытия, не менее	4.3.1.3.7	6.4	мм	1	
Вес МИИМ, не более	4.3.1.3.10	6.5	кг	15	
Жесткость пружинного блока <i>k</i> , должна составлять величину в диапазоне от 250 Н/мм до 300 Н/мм, в условиях приложения максимальной нагрузки 3000 Н	-	6.6	Н/мм	$250 \leq k \leq 300$	
Погрешность среднего значения жесткости	-	6.7	%	$\leq 5$	



Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
пружинного блока должна составлять не более 5%					
Жесткость корпуса датчика силы k должна составлять величину в диапазоне от 2700 Н/мм до 3300 Н/мм, в условиях приложения максимальной нагрузки 3000 Н	4.3.1.3.5	6.8	Н/мм	$2700 \leq k \leq 3300$	
Погрешность среднего значения жесткости пружинного блока должна составлять не более 5%	-	6.9	%	$\leq 5$	

## 7. Замечания и рекомендации

Замечаний и рекомендаций нет.

## 8. Выводы

8.1 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета индентационного измерительного модуля iPoRTH, выдержал/не выдержал испытание по пункту № 4.1.-4.9 Программы и методики RU.ЭОПРТ.00001-01 17 01 ПМ.

8.2 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета индентационного измерительного модуля iPoRTH, соответствует / не соответствует требованиям пункта № 4.технического задания, согласованного с государственным заказчиком.

## Испытание проводили

Должности, ФИО и подписи сотрудников, проводивших испытания.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ И ПРОТОКОЛ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
ИСПЫТАНИЙ ИНДЕНТАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА iPoRTN

## АКТ

### исследовательских испытаний

макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH

Соглашение 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии для финансового обеспечения затрат, связанных с выполнением прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по лоту шифр 2017-14-579-0057 по теме: «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях» (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0274.

«25» декабря 2017 г.

г. Троицк

Комиссия по проведению приемочных испытаний в составе:

председателя	заместителя директора по научной работе	Прохорова Вячеслава Максимовича
и членов комиссии	заведующего отделом функциональных и конструкционных наноматериалов	Перфилова Сергея Алексеевича
	ведущего инженера-экономиста	Сапрыкина Евгения Евгеньевича
	заведующего отделом исследования физико-механических свойств	Усеинова Алексея Серверовича

назначенная приказом по ФГБНУ ТИСНУМ от «23» апреля 2015 г. №28-о, в период с «1» декабря 2017 г. по «25» декабря 2017г. провела исследовательские испытания макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH.

Испытания проведены в ФГБНУ ТИСНУМ по Программе и методикам RU. ЭОПРТ.00001-01 17 01 ПМ.

#### 1. Комиссией установлено:

1.1. Программа приемочных испытаний выполнена полностью.

1.2. Объект испытаний выдержал приемочные испытания по Программе и методикам RU. ЭОПРТ.00001-01 17 01 ПМ.

## 2. Выводы

Объект испытаний соответствует всем требованиям, заданным техническим заданием Соглашения 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии для финансового обеспечения затрат, связанных с выполнением прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по лоту шифр 2017-14-579-0057 по теме: «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях» (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0274.

## 3. Замечания и рекомендации

По результатам проведённых испытаний замечаний и рекомендаций нет.

Председатель комиссии

Члены комиссии



В.М. Прохоров

С.А. Перфилов

Е.Е. Сапрыкин

А.С. Усеинов

## ПРОТОКОЛ

### испытания по пункту № 4.1.- 4.9.

Программы и методики исследовательских испытаний макета индентационного измерительного модуля экспериментального образца iPoRTH  
RU.ЭДНтПС.00001-01 14 01 ПМ

№ 1

«25» февраля 2017 г.

1. **Объект испытания:** Экспериментальный образец, акт изготовления № \_\_\_ от «07» января 2017 г
2. **Цель испытания:** проверка соответствия объекта испытания требованиям пункта № 4 технического задания: 4.2.3; 4.3.1.2.2; 4.3.1.3.5; 4.3.1.3.7; 4.3.1.3.10; 4.3.1.3.2
3. **Дата начала испытания:** 25.12 2017 г
4. **Дата окончания испытания:** 25.12 2017 г
5. **Место проведения испытания:** г. Москва, г. , ул. Центральная, 7а, ФГБНУ ТИСНУМ, отдел исследования физико-механических свойств
6. **Результаты испытания**

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
Обеспечение возможности функционирования МИИМ, будучи установленным на произвольную систему позиционирования, обеспечивающую подвод измерительного индентора с точностью не менее 1 мм на расстояние не более 5 мм к исследуемой поверхности	4.2.3	6.1		соответствие	соответствует
Индентационный измерительный модуль должен обеспечивать установки сферообразных наконечников (сфероконических или иных) для проведения измерений путем вдавливания, в том числе наконечников с радиусом кривизны кончика от 300 мкм до 2,5 мм	4.3.1.2.2 4.3.1.3.2	6.2		обеспечение	обеспечивает
Измеряемый диапазон прикладываемой нагрузки $P$ на поверхность образца в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация, не менее	4.3.1.3.5	6.3	Н	3000	3200
Измеряемый диапазон погружения индентирующего наконечника $d$ в режиме измерения диаграммы нагрузка-пластическая деформация в зависимости от механических свойств исследуемого материала и толщины покрытия, не менее	4.3.1.3.7	6.4	мм	1	2
Вес МИИМ, не более	4.3.1.3.10	6.5	кг	15	14,5
Жесткость пружинного блока $k$ , должна составлять величину в диапазоне от 250 Н/мм до 300 Н/мм, в условиях приложения максимальной нагрузки 3000 Н	-	6.6	Н/мм	$250 \leq k \leq 300$	269
Погрешность среднего значения жесткости пружинного блока должна составлять не	-	6.7	%	$\leq 5$	0,7

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
более 5%					
Жесткость корпуса датчика силы k должна составлять величину в диапазоне от 2700 Н/мм до 3300 Н/мм, в условиях приложения максимальной нагрузки 3000 Н	4.3.1.3.5	6.8	Н/мм	$2700 \leq k \leq 3300$	3125
Погрешность среднего значения жесткости пружинного блока должна составлять не более 5%	-	6.9	%	$\leq 5$	1,5

### 7. Замечания и рекомендации

Замечаний и рекомендаций нет.

### 8. Выводы

#### 8.1 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета индентационного измерительного модуля iPoRTH, выдержал/не выдержал испытание по пункту № 4.1.-4.9 Программы и методики RU.ЭДНтПС.00001-01 14 01 ПМ.

#### 8.2 Объект испытания:


Экспериментальный образец макета индентационного измерительного модуля iPoRTH, соответствует / не соответствует требованиям пункта № 4.технического задания, согласованного с государственным заказчиком.

### Испытание проводили

Заведующий отделом коммерциализации  
и мониторинга договоров и контрактов

  
А.В. Мамонов

Заведующий отделом исследований  
физико-механических свойств

  
А.С. Усеинов

Главный метролог

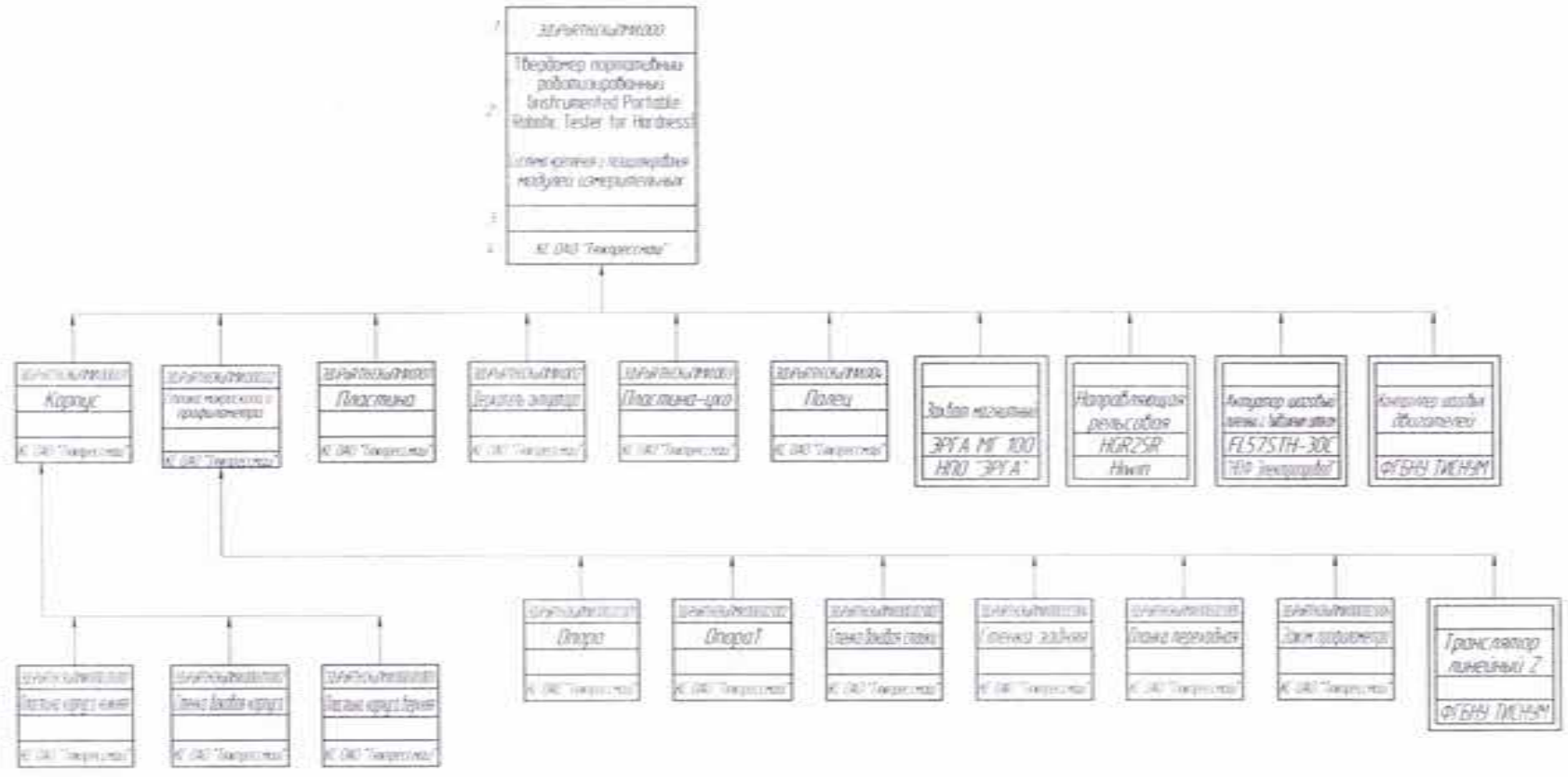
  
В.В. Соловьев

Научный сотрудник

  
К.С. Кравчук

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ЭКД НА МАКЕТ СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ iPoRTH

- Схема деления модулей измерительных структурная ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000 Е1;
- Чертеж общего вида ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000 ВО;
- Чертеж Пластина ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.001;
- Чертеж Держатель актюатора ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.002;
- Чертеж Пластина-ухо ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.003;
- Чертеж Палец ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.004;
- Чертеж Пластина корпуса нижняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.001;
- Чертеж Стенка боковая корпуса ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.002;
- Чертеж Пластина корпуса верхняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.003;
- Чертеж Опора ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.001;
- Чертеж Опора 1 ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.002;
- Чертеж Стенка боковая стойки ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.003;
- Чертеж Стенка задняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.004;
- Чертеж Планка переходная ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.005;
- Чертеж Зажим профилометра ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.006.

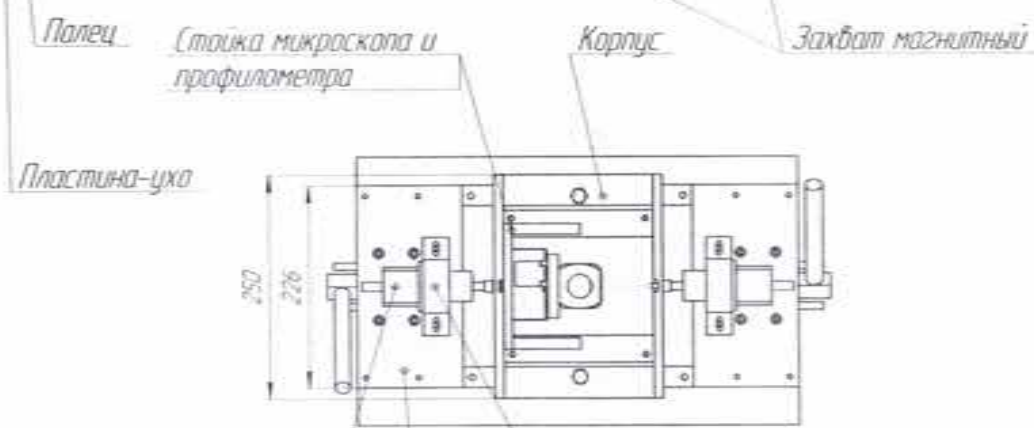
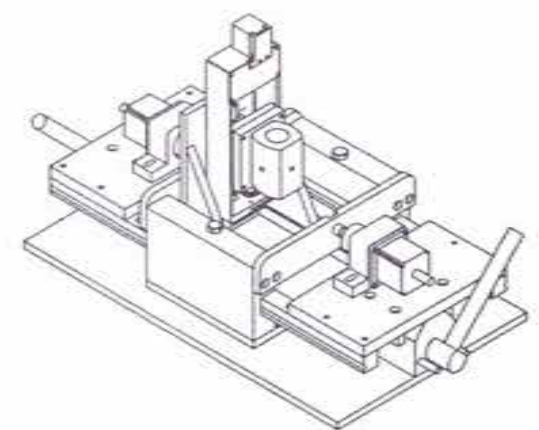
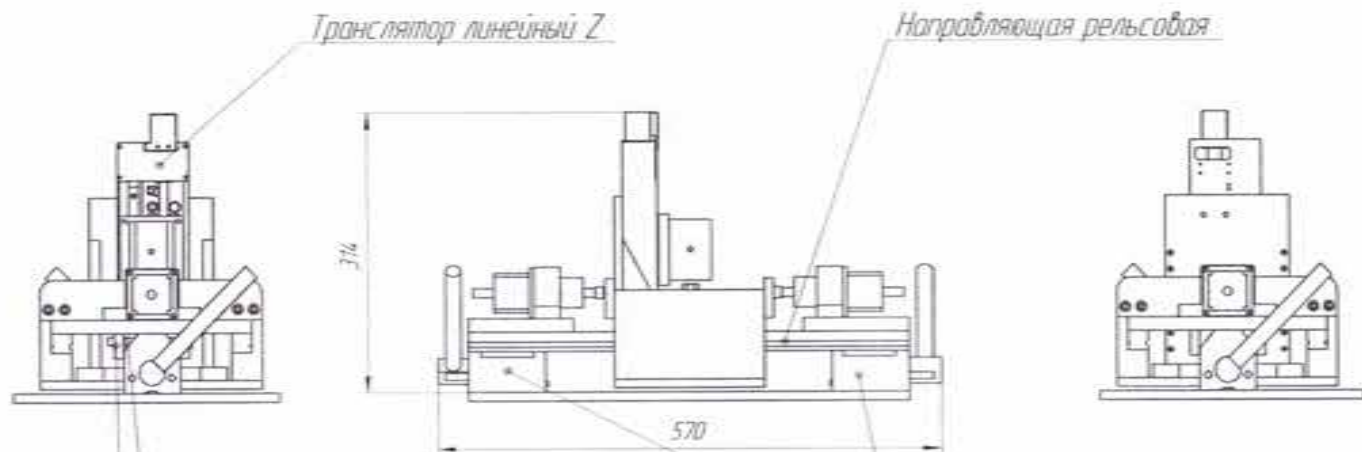


В строке 4 указать ассемблеры.

ЗЫРТОК/ЫРТОК ET		К. ДАТ "Тыргытчы"
Исполнитель	Проверенный	Дата
Составитель	Проверенный	Дата
Специалист	Проверенный	Дата
Инженер	Проверенный	Дата
Мастер	Проверенный	Дата
Работник	Проверенный	Дата
Специалист	Проверенный	Дата
Инженер	Проверенный	Дата
Мастер	Проверенный	Дата
Работник	Проверенный	Дата



Лист 1 из 1  
 Дата: 2023.08.01  
 Проект: ЭДРР-РПТНСК/ПМ.000.00.00



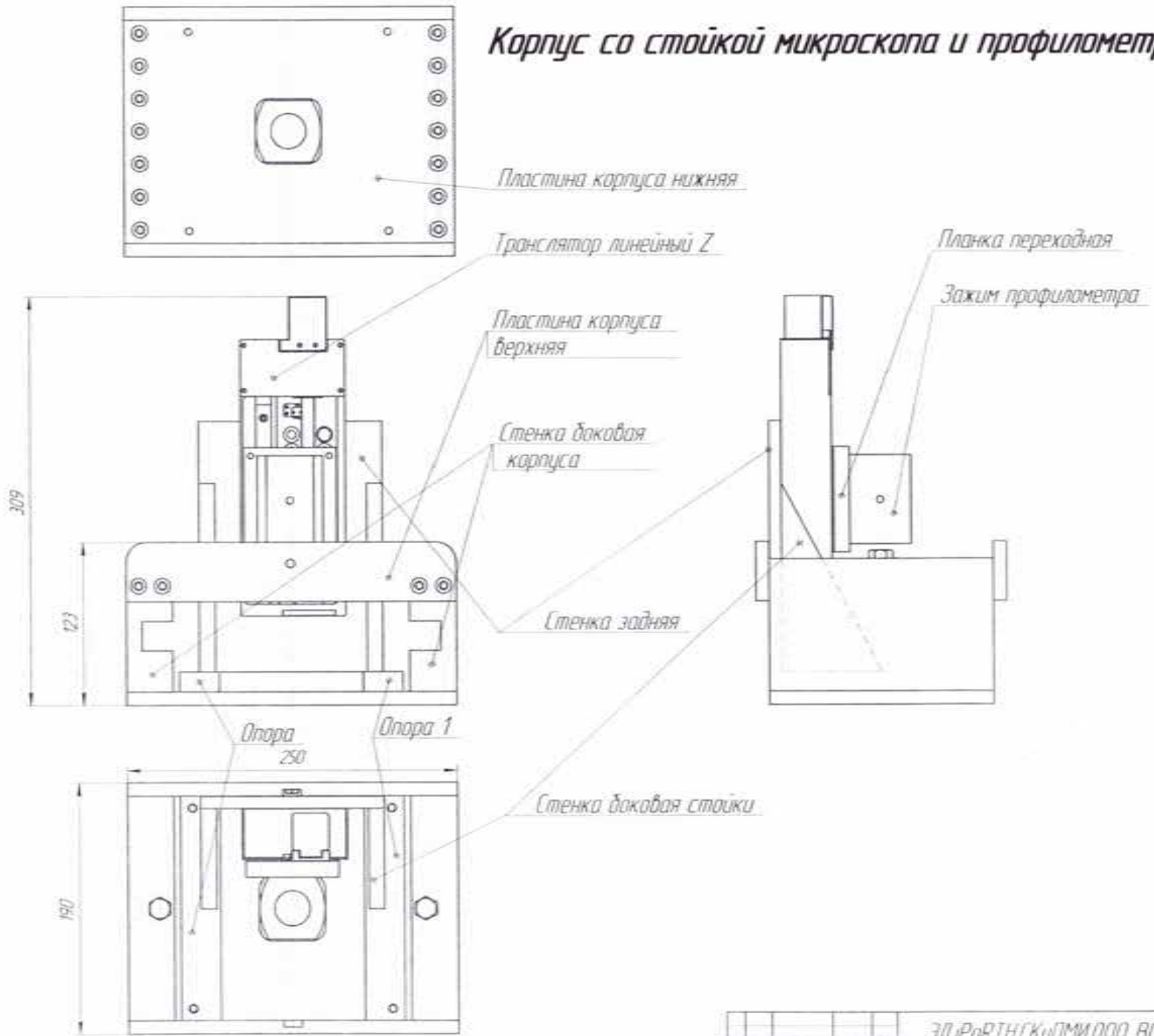
**Техническая характеристика**

Система удержания на поверхности образца	магнитная
Подвод наконечник индентирующего модуля измерительного индентационного с точностью не менее 1 мм на расстояние	не более 5 мм
Подвод с точностью не менее 0,1 мм на расстояние микроскопа оптического профилометра конфокального	≥ 95 мм ≥ 13,35 мм

1 Кабели электрического соединения между элементами на чертеже не показаны.  
 2 Контроллер шаговых двигателей на чертеже не показан.

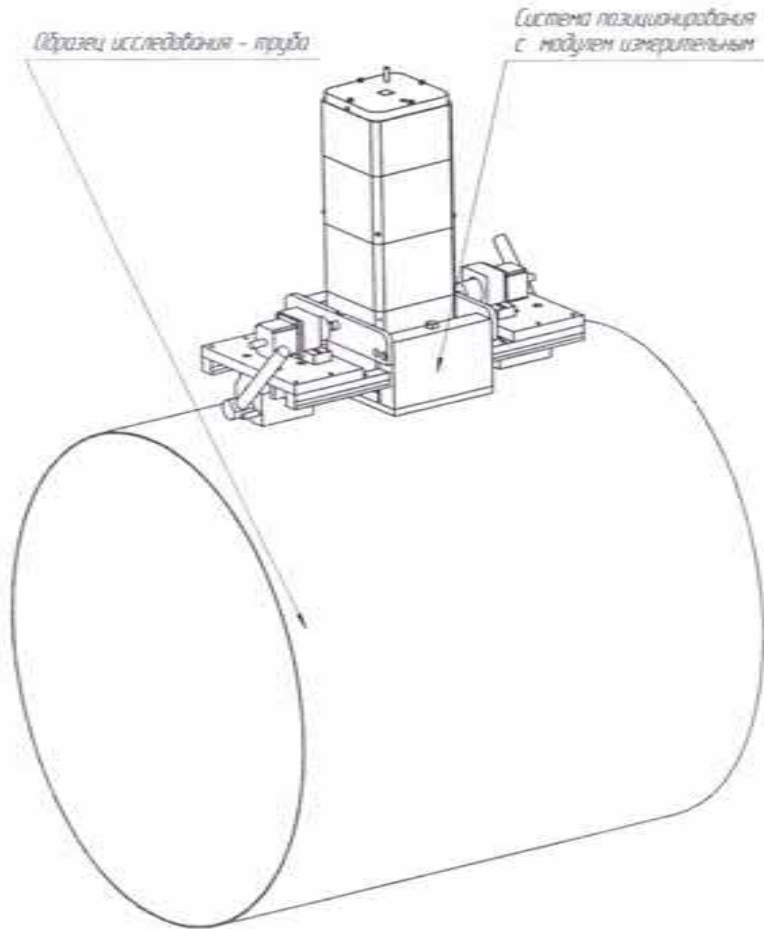
ЭДРР-РПТНСК/ПМ.000.00.00			
Исполн.	Провер.	Дата	Лист
Исполн.	Провер.	Дата	11
Изд. 01.01.2023 Изменения 1. Изменен материал изготовления корпуса.			КЭ ДАУ "Техпрессом" Форма: А2

# Корпус со стойкой микроскопа и профилометра

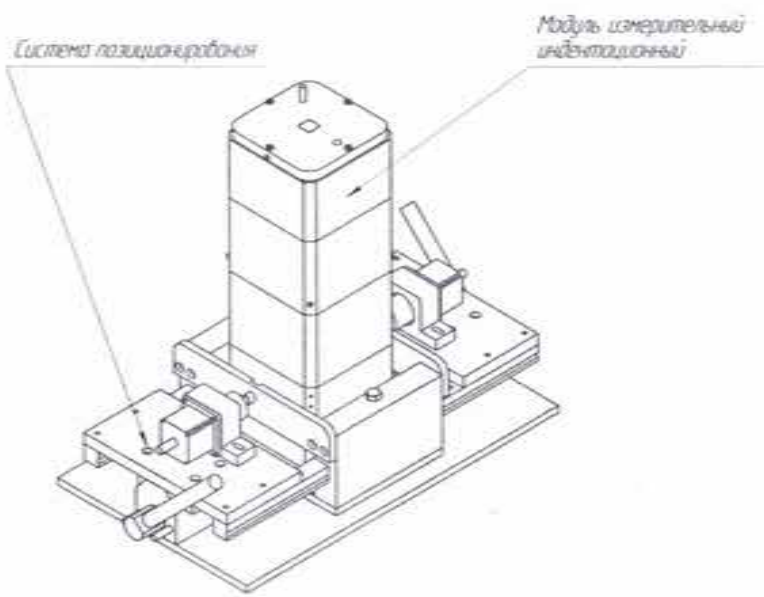
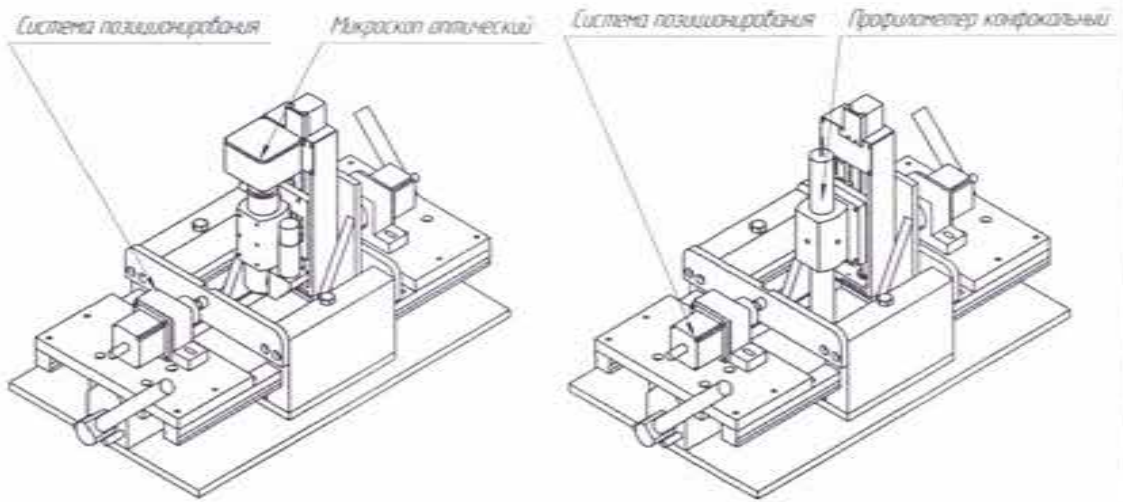


ЭД.Р.07Н.СК.01.М.000.В.0  
Лист 1 из 1  
2011.08.08

### Установка модуля измерительного на образец исследования



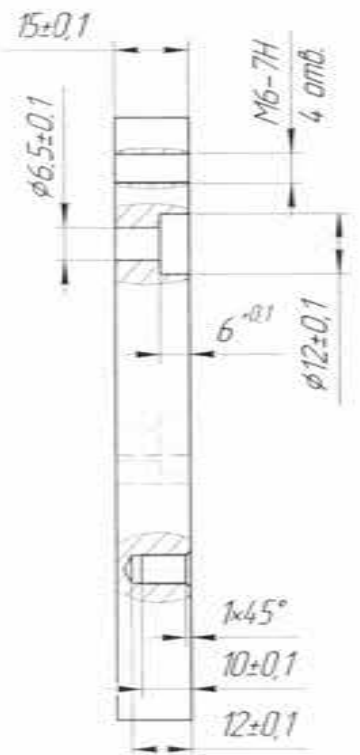
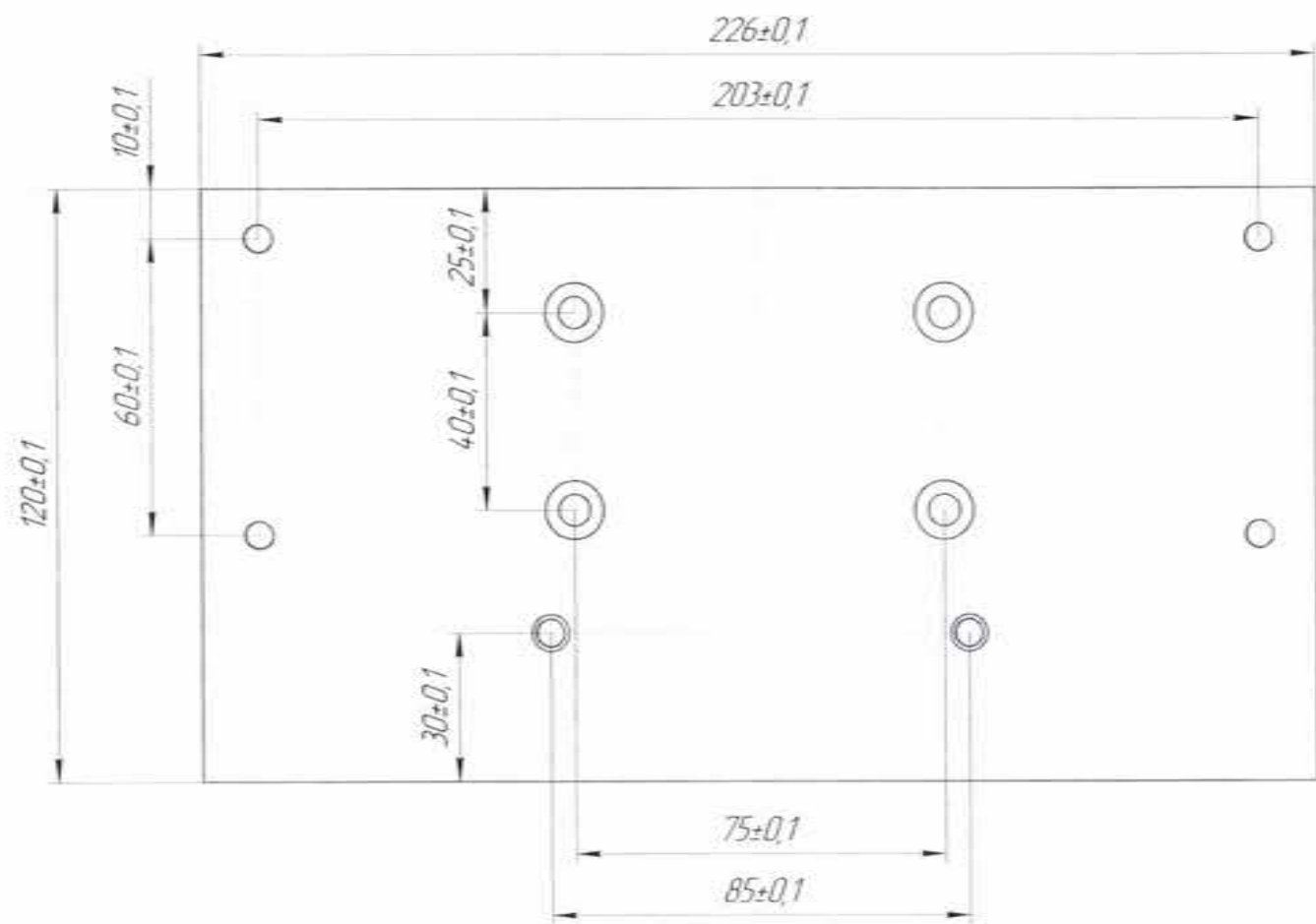
### Установка модулей измерительных в систему позиционирования



ЭД.РФ.ПТН.СК.ПМ.000.В0  
Лист 1 из 2  
2023-11-08


ЭД.ІРОРТН.СКУПМИ.001

3,2 ✓(✓)



Инд. № листа / Подп. и дата / Взам. инв. № / Инв. № докум. / Стр. № / Лист №

Исполн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разработ.	Климова	Л.И.	3.11.12	
Проб.	Гудовин	Л.И.	3.11.12	
Техн. отв.				
Исполн.	Безрукова	Л.И.	3.11.12	
Удп.	Петров	Л.И.	3.11.12	

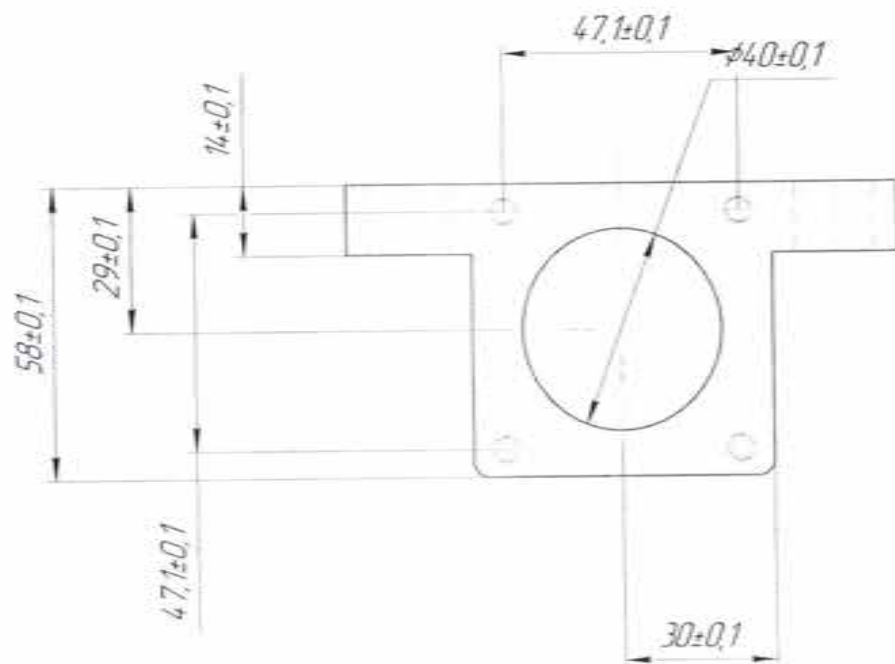
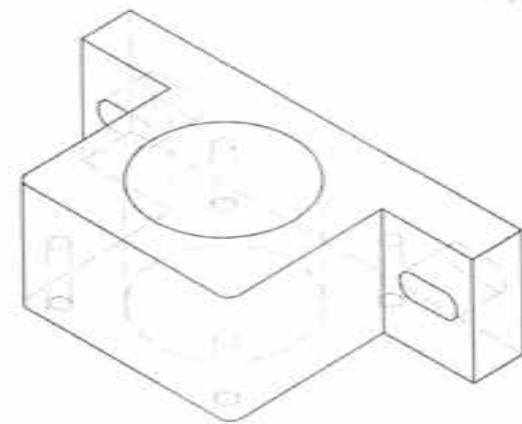
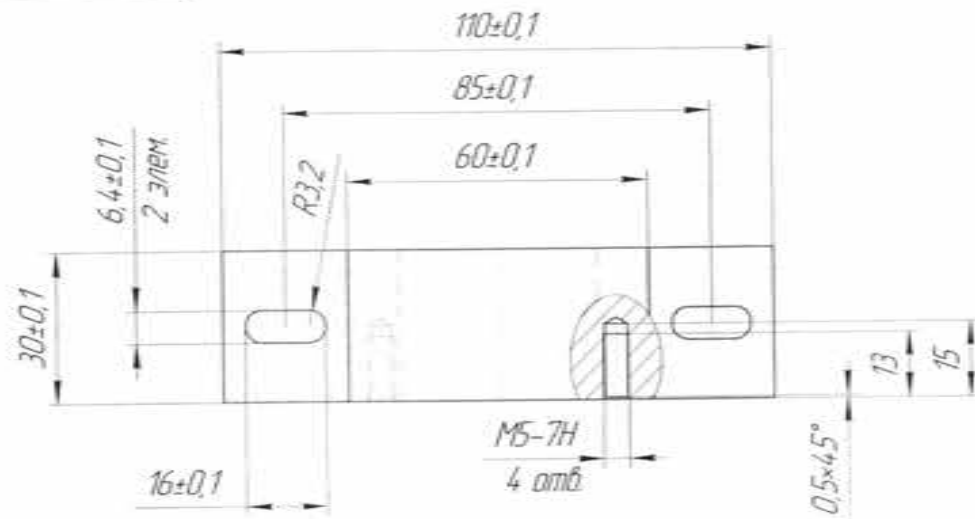
ЭД.ІРОРТН.СКУПМИ.001					
Пластина			Лист	Масса	Масштаб
					1:1
Д16 ГОСТ 4784-97			Лист	Листов	1
КС ОАО "Тяжпрессмаш"					

Консультант

Формат А3

ЭД.РОРТН.СКУПМИ.002

3,2 ✓(✓)



1 \*Размеры для справок.  
 2 H14, h14, ± 1/2 IT14

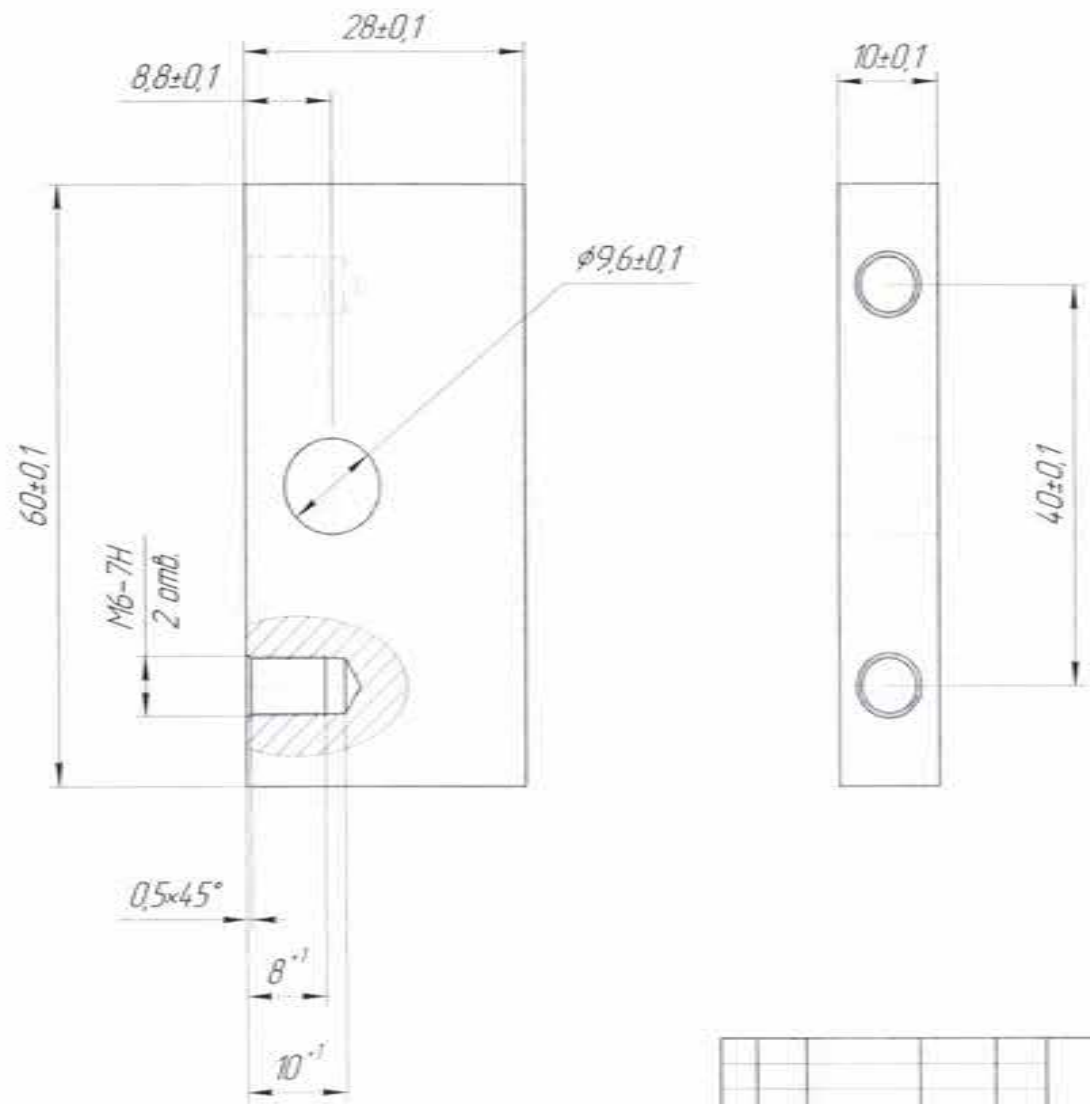
ЭД.РОРТН.СКУПМИ.002				Лист	Масса	Масштаб
Изм/Лист	№ докум	Подп	Дата		0,24	1:1
Разработ	Климова	Кли	22.12			
Проб	Гудилкин	Гуд	3.10			
Инжпр						
Исполн	Безрукова	Без	3.10			
Черт	Петров	Пет	3.10			
Д16 ГОСТ 4784-97				Лист	Листов	1

Держатель актуатора  
 КС ОАО "Тяжпрессмаш"

Имя, № листа | Дата и время | Имя, № листа | Дата и время | Серия № | Дата и время

ЭД.РОРТН.СКУПМИ.003

3,2  
√(✓)

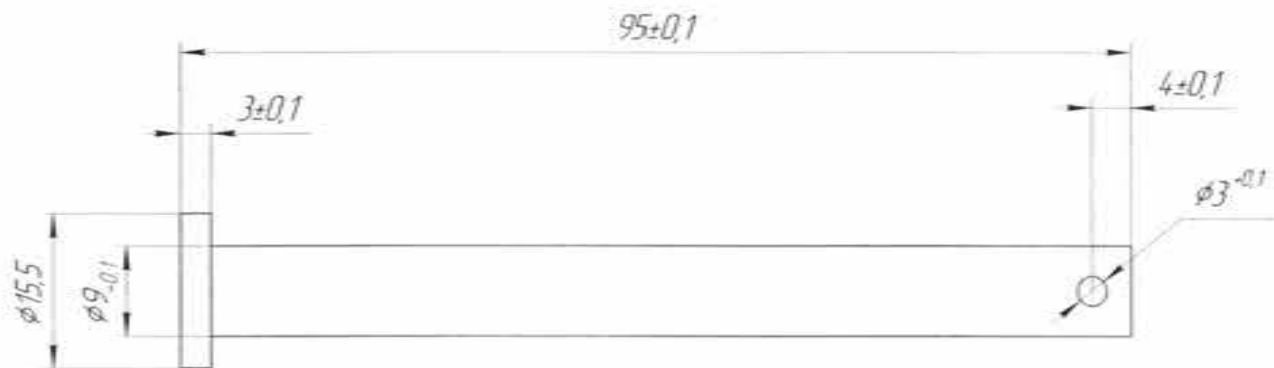


Инд. № подл. Подп. и дата. Взам. инд. № Инд. № подл. Подп. и дата. Стр. №

				ЭД.РОРТН.СКУПМИ.003			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Пластина-ухо	Лист	Масса	Максимум
Разработ	Климова	К.И.	02.12				21
Проб	Гудилев	Г.	21.12		Лист	Листов	1
Технотр							
Исполн	Безрукова	С.И.	21.12	Д16 ГОСТ 4784-97	КС ОАО "Тяжпрессмаш"		
Удп	Петров	А.С.	21.12	Копировать	Формат А3		

ЭД.РОРТН.СКУПМИ.004

3,2 ✓(✓)



Горизонтально

Стрелка №

Полн. и дата

Взам. инв. №

Инв. № докум.

Полн. и дата

Инв. № подл.

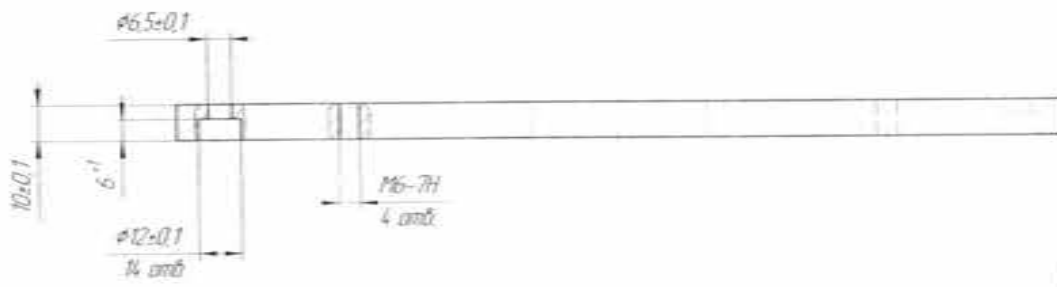
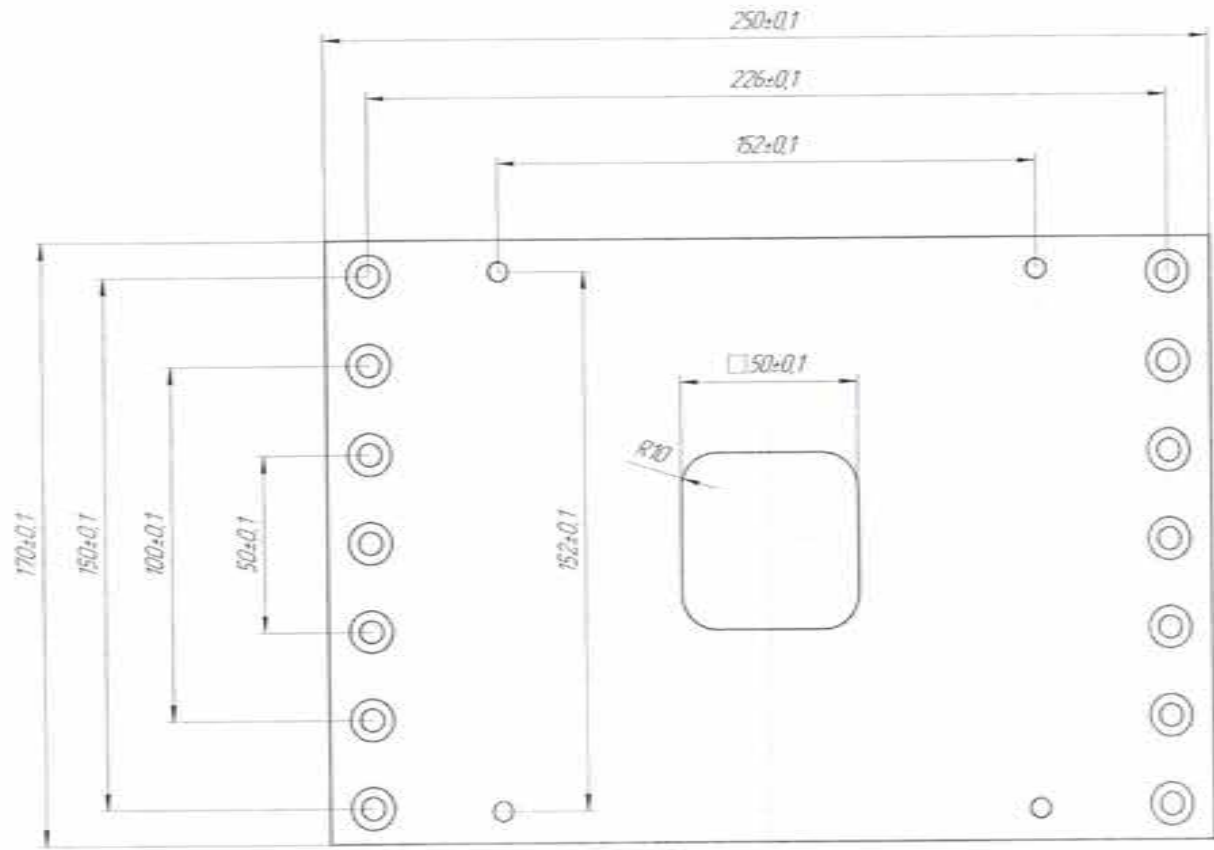
				ЭД.РОРТН.СКУПМИ.004			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Палец	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Калинабова	К.А.	2014				2:1
Проб.	Гудимов	Г.В.	2.11.14		Лист	Листов	1
Инженер	Безрукова	Ю.В.	2.11.14	Д16 ГОСТ 4784-97		КС ОАО "Тяжпрессмаш"	
Удп.	Петров	Ф.И.	2.11.14				

Контур

Формат А3

ЭД.Р0.РТН.СК.ПМ.000.01.001

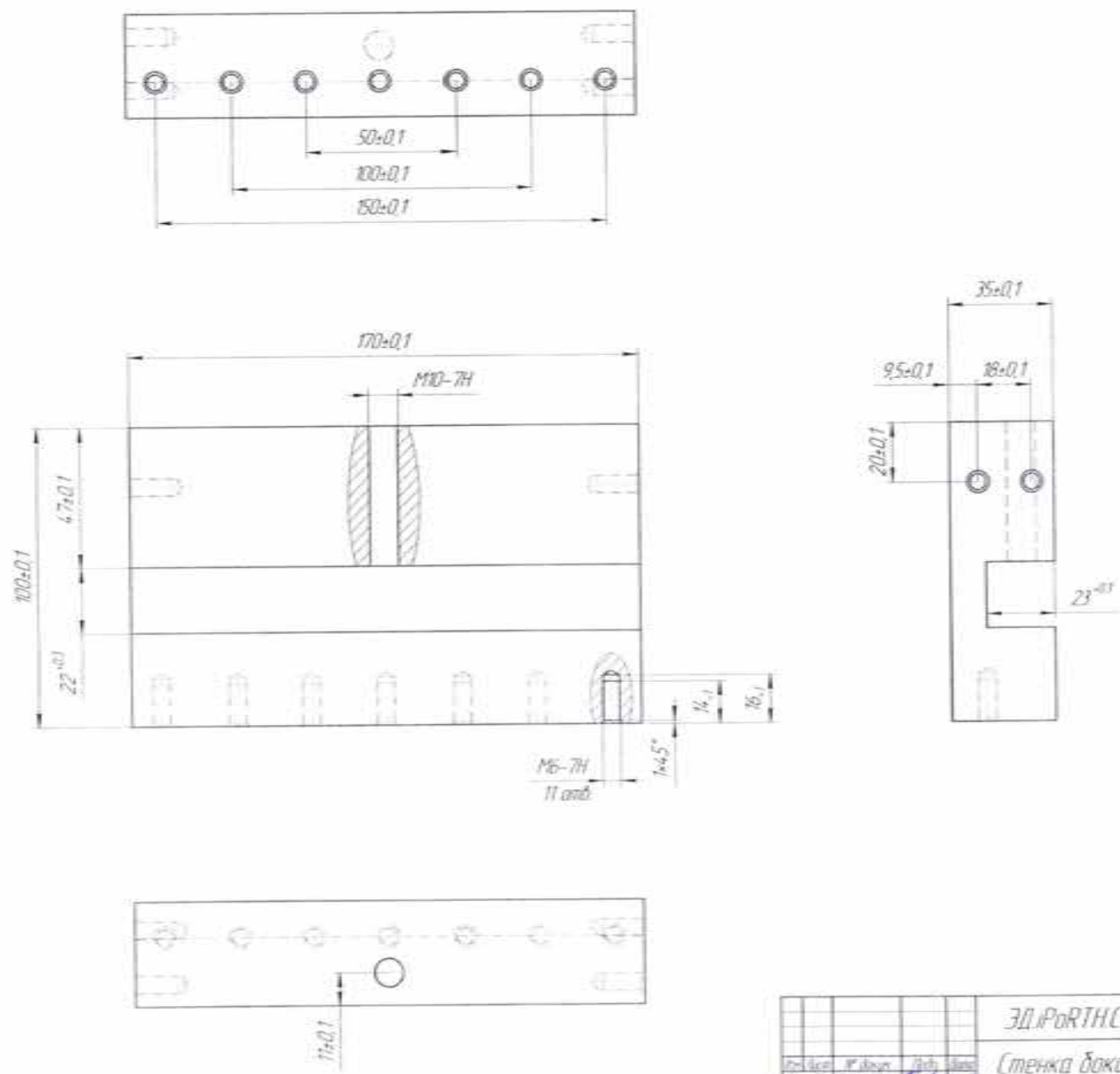
32 ✓ (✓)



ЭД.Р0.РТН.СК.ПМ.000.01.001  
 ЭД.Р0.РТН.СК.ПМ.000.01.001  
 ЭД.Р0.РТН.СК.ПМ.000.01.001  
 ЭД.Р0.РТН.СК.ПМ.000.01.001

ЭД.Р0.РТН.СК.ПМ.000.01.001						Ип	Нк	Нк	Нк
Ип	Ип	Ип	Ип	Ип	Ип	11			
Пластина корпуса НИЖНЯЯ									
Д16 ГОСТ 4784-97						АС ОАО "Техпром"			
Корпус						Корпус А1			



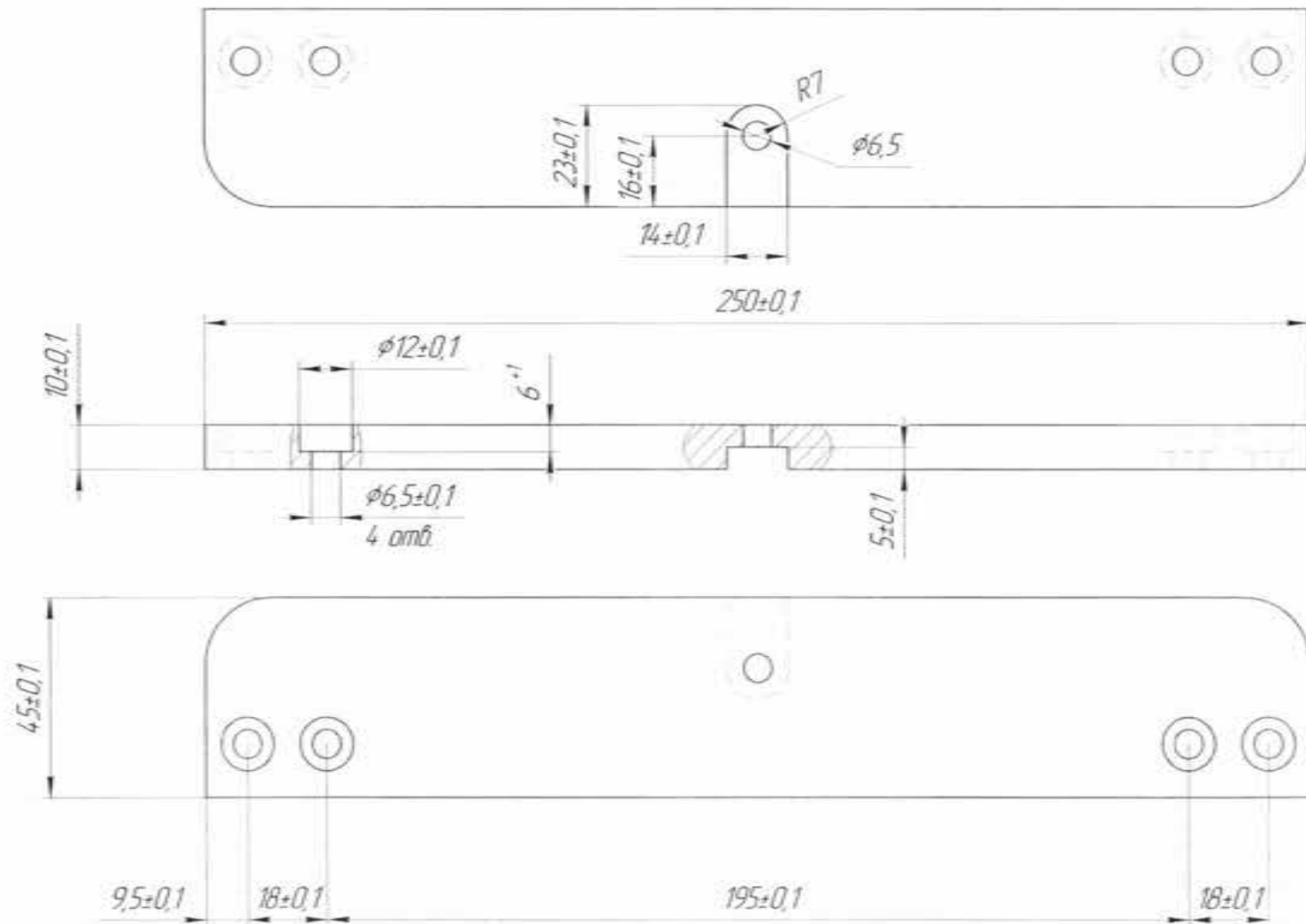


ЭД.Р0РТН.СК.ЛМИ.000.01.002				Лист	Масса	Масштаб
Стенка баковая корпуса						1:1
Д16 ГОСТ 4784-97				Лист	Листов	1
Исполн:	Проверен:	Утвержден:	Согласован:	К. 040 "Техреском"		
Масштаб:	Материал:	Сечение:	Сварка:	Корпус		

ЭД.Р0РТН.СК.ЛМИ.000.01.002

ЭД.Р0РТН.СКУПМИ.000.01.003

3,2 ✓(✓)



Полн. название

Склад. №

Посл. и дата

Взам. инв. №

Посл. и дата

Инд. № листа

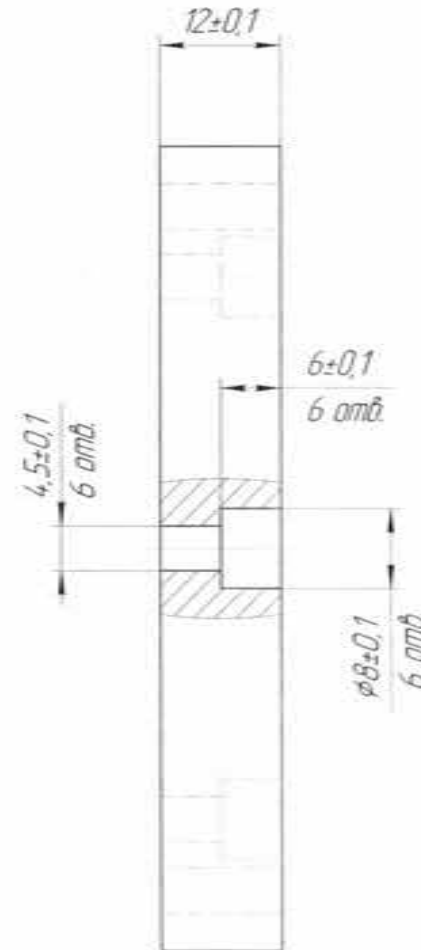
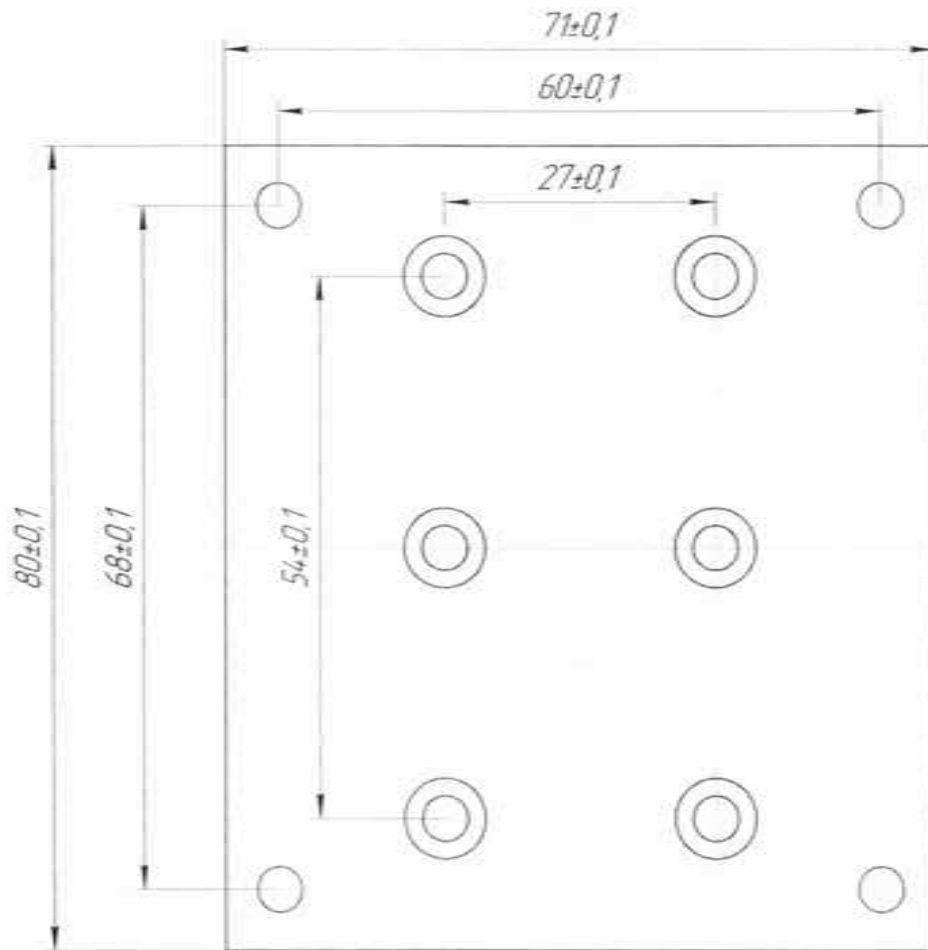
ЭД.Р0РТН.СКУПМИ.000.01.003				Лист	Масса	Масштаб
Пластина корпуса верхняя						1:1
Д16 ГОСТ 4784-97				Лист	Листов	1
КС ОАО "Тяжпрессмаш"						

Копирован

Формат А3

ЭД.Р0RTH.CKиПМИ.000.02.005

3,2 √(✓)



Изм. № разраб. Разраб. и дата. Взам. инв. №. Инв. № докум. Подп. и дата. Стр. №. Всего страниц.

ЭД.Р0RTH.CKиПМИ.000.02.005			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Разраб.	Клеменко	Р.И.	20.11.14
Проб.	Гудилкин	В.И.	20.11.14
Г. контр.			
И. контр.	Козарькова	С.В.	20.11.14
Чит.	Петров	В.И.	20.11.14
Планка переходная			Лист
Д16 ГОСТ 4784-97			Листов 1
КС ОАО "Тяжпрессмаш"			1

Копировать

Формат А3

ЭД.Р0RTH.CKцПМИ.000.02.006

3,2  
√(✓)

Склад №

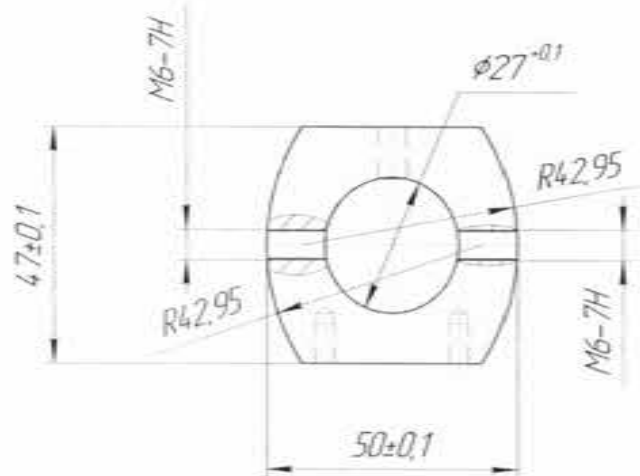
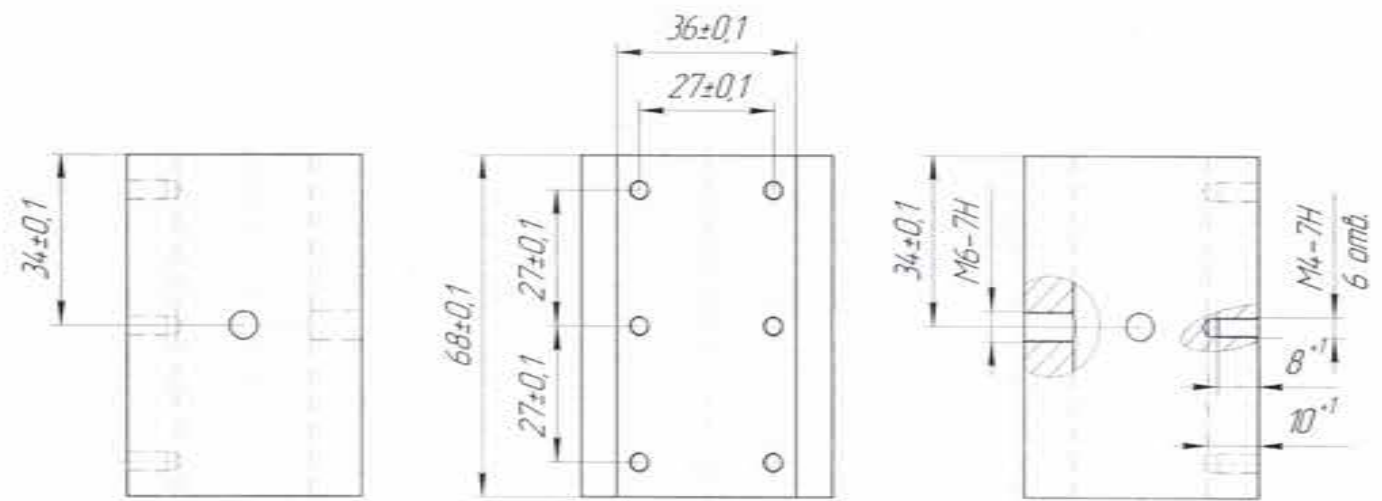
Склад №

Лист и дата

Лист и дата

Лист и дата

Лист и дата



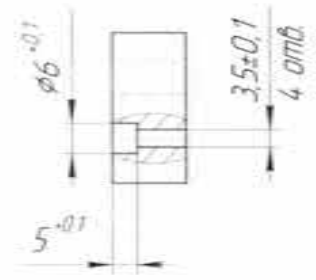
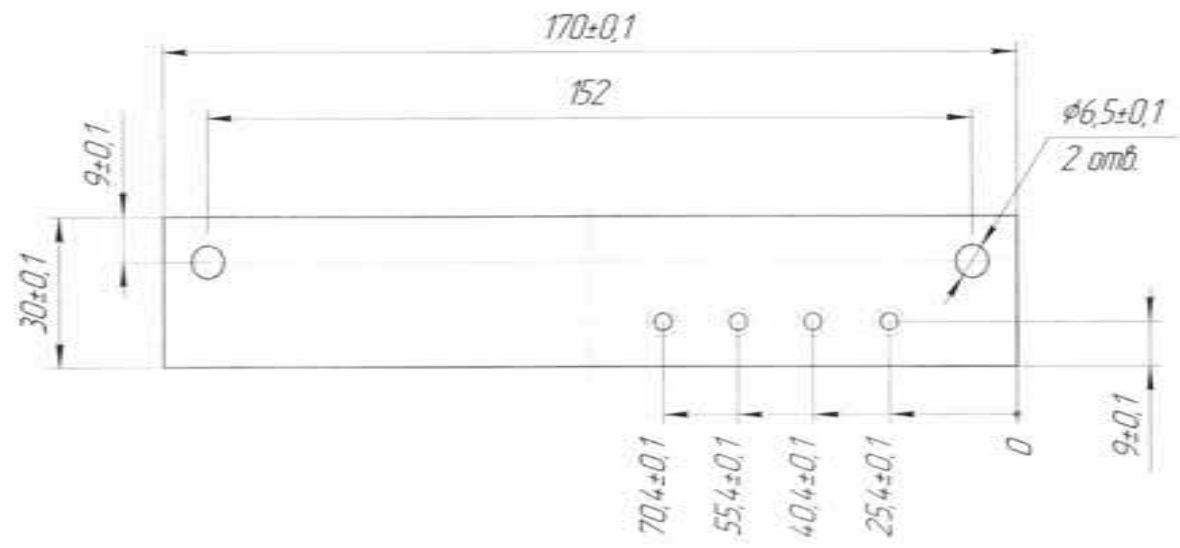
ЭД.Р0RTH.CKцПМИ.000.02.006			
К-т	Лист	№ докум	Лист
Разраб	Клишова	Лид	3.11.02
Проб	Гудилан	Лид	3.11.02
Т.контр			
Начерт	Безрукова	Лид	3.11.02
Удб	Петров	Лид	3.11.02
Зажим профилометра			Лист
Д16 ГОСТ 4784-97			Листов 1
КС ОАО "Тяжпрессмаш"			Стр. 1

Копирбол

Стр. 1

ЭД.Р0РТН.СКУПМИ.000.02.001

3,2  $\sqrt{R}$

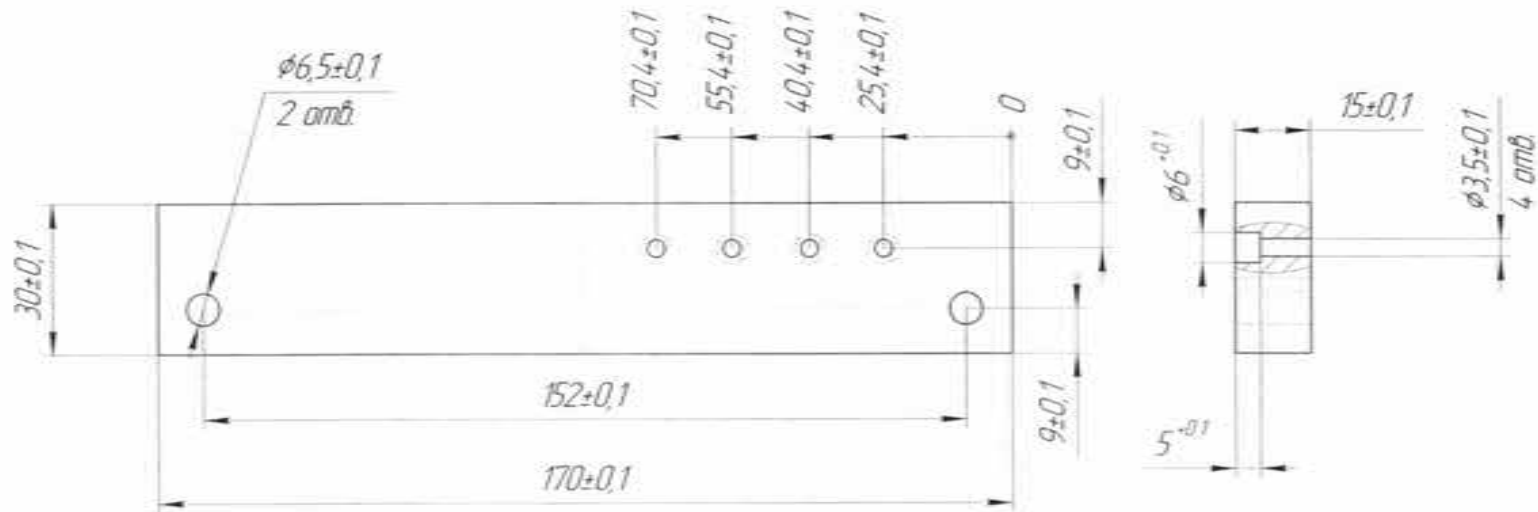


Имя № подл. Подп. и дата. Взам. инв. № Инв. № дуд. Подп. и дата. Слово №. Подп. и дата.

				ЭД.Р0РТН.СКУПМИ.000.02.001					
Ит./Лист	№ докум	Подп.	Дата	Опора		Лист	Масса	Масштаб	
Разраб	Климова	И.И.	2017					11	
Проб	Гудков	С.А.	2018			Лист	Листов	1	
Исполн	Безрукова	С.М.	2018	Д16 ГОСТ 4784-97		КС ОАО "Тяжпрессмаш"			
Удб	Генерал	Игорь	ЗКА	Контракт		Формат А3			

ЭД.РОРТН.СКУПМИ.000.02.002

3,2  
√(✓)



Лист № докум. 1  
Склад № 1  
Изм. № 1  
Изм. № 2  
Изм. № 3  
Изм. № 4  
Изм. № 5  
Изм. № 6  
Изм. № 7  
Изм. № 8  
Изм. № 9  
Изм. № 10

ЭД.РОРТН.СКУПМИ.000.02.002				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Климова	Кузнецов	3.10.07	
Проб.	Гудилкин	3.11.07		
Инженер				
Исполн.	Безрукова	3.11.07	3.11.07	
Чел.	Петров	3.11.07		
<b>Опора 1</b>				
Д16 ГОСТ 4784-97				
Лист	Масса	Максимум		
Лист	Листов	1		
КС ОАО "Тяжпрессмаш"				

Копировать

Страна А1

ЭД.РОРТН.СК.ПМИ.000.02.003

Листовой номер

Стандарт №

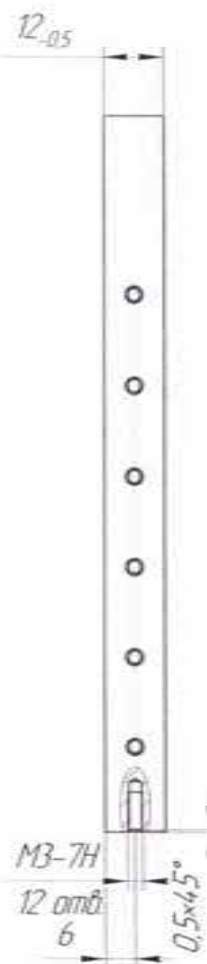
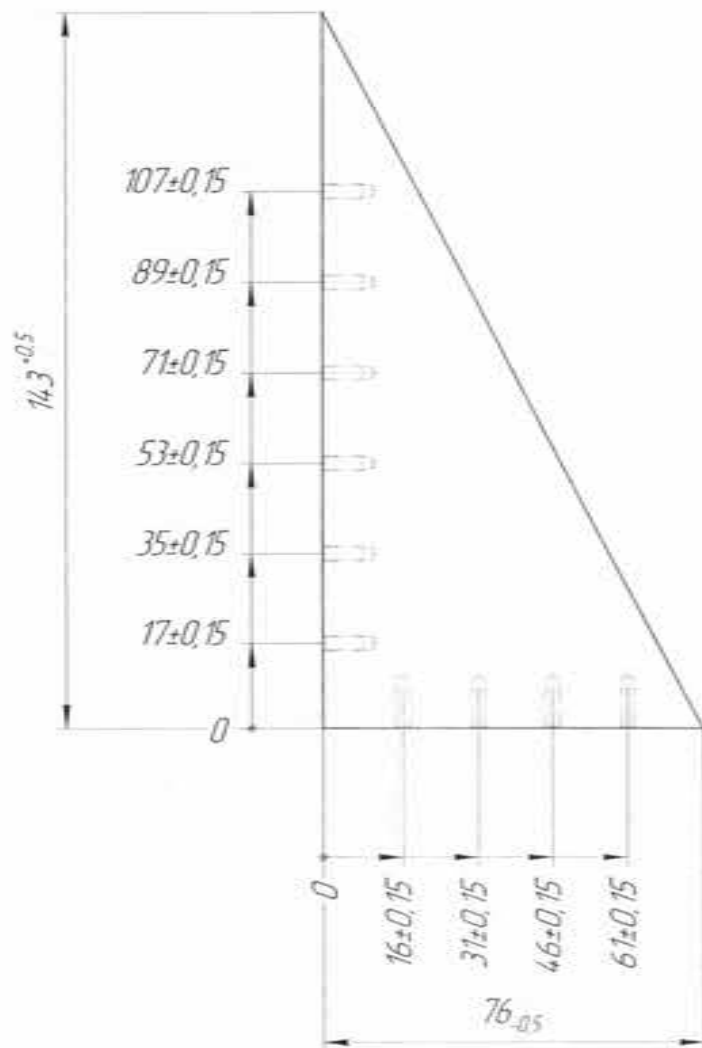
Наименование

Материал

Вид и номер

Наименование

Материал



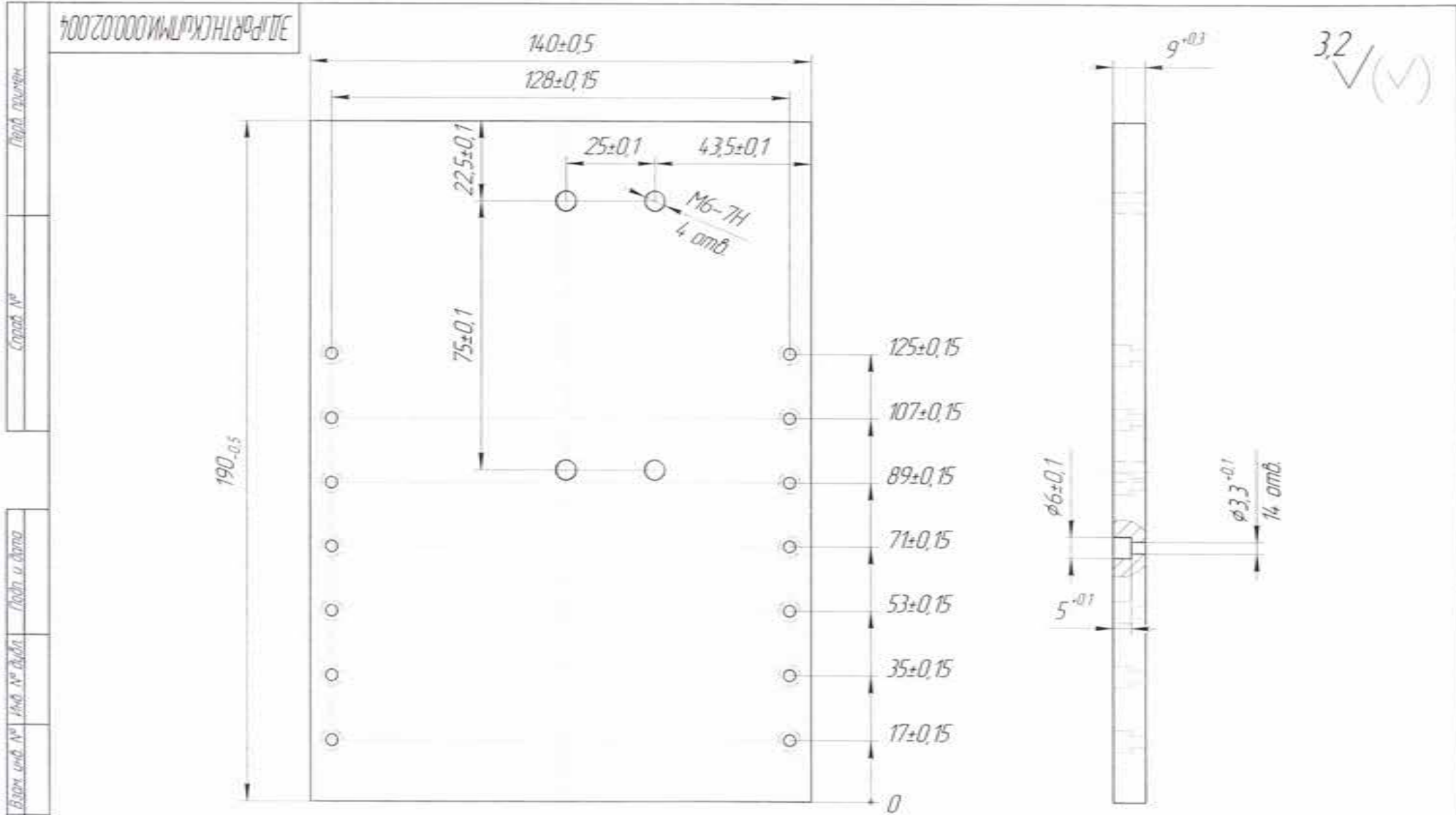
3,2 ✓ (✓)

1. Отверстия выполнить по сопрягаемым деталям.

ЭД.РОРТН.СК.ПМИ.000.02.003				Лист	Масса	Масштаб
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	0.18	11
Разраб.	Климова	Григорьев	31.11.14			
Проб.	Гудимов	Григорьев	2.12.14			
Т.контр.				Лист	Листов	1
Исполн.	Безрукова	Григорьев	3.12.14	Д16 ГОСТ 4784-97		
Удобр.	Петров	Григорьев	30.11.14	КС ОАО "Тяжпрессмаш"		

Копировать

Формат А1



Инд. № листа	Лист и дата	Взам. инд. №	Инд. № докум.	Лист и дата	Склад. №	Подоб. специалист

<b>ЭД.іРoPTH.CКuПMИ.000.02.004</b>			
Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разработ	Калинича	Е.В.	3.11.14
Проб.	Гудимен	В.В.	3.11.14
Инженер			
Исполн.	Безрукова	Е.В.	3.11.14
Мод.	Петров	В.В.	3.11.14
<b>Стенка задняя</b>			
		Лист	Масса
		1	0,66
		Листов	11
		1	
<b>Д16 ГОСТ 4784-97</b>			
		КС ОАО "Тяжтресмаш"	
Копиробот		Формат А7	



ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ  
И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ iPORTH

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор  
ОАО «Тяжпрессмаш»

А.М. Володин

4 декабря 2017 г.

### Акт изготовления объектов испытаний

макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца портативного роботизированного твердомера (iPoRTH) по Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.577.21.0274  
Шифр 2017-14-579-0057

4 декабря 2017 г.

г. Рязань

Комиссия в составе:

председателя	Зам. гл. инженера	В.В. Абрамяна
членов комиссии	Зам. гл. инженера	Н.П. Петрова
	Начальника цеха №2	О.П. Агафонова
	Главного металлурга	С.М. Хорикова,

назначенная приказом по ОАО «Тяжпрессмаш» от 18 сентября 2017 г. № 1527А, составила настоящий акт о нижеследующем:

#### 1. Комиссии предъявлены:

1.1 Макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца портативного роботизированного твердомера (iPoRTH) в количестве 1 шт.

1.2 Конструкторская документация на макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментального образца портативного роботизированного твердомера (iPoRTH) в составе:

- Схема деления модулей измерительных структурная  
ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000 Е1;

- Чертеж общего вида ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000 ВО;
- Чертеж Пластина ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.001;
- Чертеж Держатель актюатора ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.002;
- Чертеж Пластина-ухо ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.003;
- Чертеж Палец ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.004;
- Чертеж Пластина корпуса нижняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.001;
- Чертеж Стенка боковая корпуса ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.002;
- Чертеж Пластина корпуса верхняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.01.003;
- Чертеж Опора ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.001;
- Чертеж Опора 1 ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.002;
- Чертеж Стенка боковая стойки ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.003;
- Чертеж Стенка задняя ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.004;
- Чертеж Планка переходная ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.005;
- Чертеж Зажим профилометра ЭД.iPoRTH.СКиПМИ.000.02.006.

## **2.В результате проверки установлено:**

2.1. Объект испытаний изготовлен ОАО «Тяжпрессмаш» в период с 6 ноября 2017 г. по 4 декабря 2017 г. в соответствии с документацией на объект испытаний (см. комплект чертежей по п.1.2) в комплектности, установленной техническим заданием.

### 3. Вывод

Объект испытаний пригоден для проведения исследовательских испытаний.

Председатель

Члены комиссии

Four handwritten signatures in blue ink, arranged vertically. The top signature is the most legible, appearing to be 'В.В. Абрамян'. The other three are more stylized and difficult to read.

В.В. Абрамян

Н.П. Петров

О.П. Агафонов

С.М. Хориков

ПРИЛОЖЕНИЕ И. ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «Тяжпрессмаш»

А.М. Володин

24 марта 2017 г.



**ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

**МАКЕТА СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА**

iPoRTH

RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ

Зам. гл. инженера

В.В. Абрамян

Начальник цеха №2

О.П. Агафонов

Зам. гл. инженера

Н.П. Петров

Начальник цеха №12

А.А. Козлов

г. Рязань – 2017

## Условные обозначения и сокращения, принятые в тексте

МСКП	Макет системы крепления и позиционирования iPoRTH
ТЗ	Техническое задание
ЭКД	Эскизная конструкторская документация
ПМ	Программа и методика испытаний

## 1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний).

Макет системы крепления и позиционирования iPoRTH (далее по тексту – МСКП)

1.2 Цель испытаний: подтверждение соответствия характеристик объекта всем требованиям, заданным ТЗ, в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации (применения, использования).

## 1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания

## 1.3.1 Испытания проводятся на одном объекте испытания

1.3.2 Объект испытаний предъявляется на испытания в следующей комплектности:

- объект испытаний;
- упаковка;

1.3.3 Объект испытаний предъявляется на испытания в следующем составе и в сопровождении следующих документов:

- индентационный измерительный модуль, оснащенный соединительными кабелями;

- система крепления и позиционирования измерительных модулей;

- техническое задание по Соглашению 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии для финансового обеспечения затрат, связанных с выполнением прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по лоту шифр 2017-14-579-0057 по теме: «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного

технологического контроля геометрических и механических характеристик материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях» (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0274);

- настоящая ПМ;
- акт изготовления объекта.

## 2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

### 2.1 Место проведения испытаний

Испытания проводятся на базе ОАО «Тяжпрессмаш», г. Рязань, ул. Промышленная, 5.

### 2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Перечень средств проведения испытаний приведён в приложении Б.

2.2.2 Средства измерений, указанные в приложении Б, могут быть заменены аналогами, обладающими схожими метрологическими характеристиками.

### 2.3 Требования к условиям проведения испытаний:

Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях:

температура окружающего воздуха, °С	23±2
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 85
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 720 до 790

### 2.4 Требования к подготовке изделия к испытаниям

МСКП и средства проведения испытаний следует подготовить к работе в соответствии с технической документацией.

2.5 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к испытаниям и испытания. К проведению испытаний допускается персонал, изучивший эксплуатационную документацию объекта испытаний.

## 3 Требования безопасности

### Требования безопасности при проведении испытаний

При проведении испытаний должны быть соблюдены требования ГОСТ 12.3.019-80. Освещенность рабочего места должна соответствовать требованиям санитарных правил СП 2.2.1.1312-03.



## 4 Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Пункт методики
4.1	Сопрягаемость макетов системы крепления и позиционирования и индентационного измерительного модуля	-		обеспечение	6.1
4.2	Система крепления или позиционирования должна обеспечивать взаимное перемещение измерительного блока и образца, а также подвод наконечника индентора к исследуемой поверхности на рабочее расстояние.	4.3.1.2.12		обеспечение	6.2
4.3	Система крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования должна обеспечивать жесткую посадку измерительного блока на линейном трансляторе или другом исполнительном механизме, используемом для взаимного перемещения измерительного блока и исследуемого образца, а также при жесткой установке измерительного модуля на объект исследования с помощью магнитных или немагнитных систем крепления	4.3.1.2.7		обеспечение	6.3
4.4	Латеральное перемещение измерительного индентационного модуля относительно тестируемого объекта, обеспечиваемое системой крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования	-	мм	не менее 20	6.4
4.5	Рабочее расстояние между индентором и поверхностью образца, обеспечиваемое системой крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования	-	мм	не менее 5	6.5

## 5 Режимы испытаний

### 5.1 Порядок испытаний.

Контроль полноты, достоверности и объективности хода и результатов исследовательских испытаний, полноты информации, соблюдения сроков испытаний и документальное оформление их результатов осуществляет комиссия, назначаемая приказом руководителя организации-исполнителя. Испытания проводятся в соответствии с планом-графиком, утверждаемым директором ОАО «Тяжпрессмаш». Последовательность проведения испытаний может быть изменена по решению комиссии.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдельных режимах испытаний:

Испытания прекращаются в случаях:

- несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;
- возникновения аварийных ситуаций.

5.3 Необходимость, условия и порядок перерыва, аннулирования или прекращения испытаний определяется комиссией.

## 6 Методы испытаний

На макет системы крепления и позиционирования и индентационного измерительного модуля

Сопрягаемость макетов системы крепления и позиционирования и индентационного измерительного модуля

6.1 Проверка по п. 4.1 Программы выполняется следующим образом:

Испытания по п.4.1 Программы проводятся путем последовательной сборки и установки макета измерительного индентационного модуля на макет системы крепления и позиционирования с целью проверки правильности выполнения и сопрягаемости изготовленных макетов.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если макет измерительного индентационного модуля удалось закрепить на макете системы крепления и позиционирования, что соответствует требованиям п.4.1 Программы.

6.2 Проверка по п. 4.2 Программы выполняется следующим образом:

Закрепленный макет индентационного измерительного модуля в системе крепления и позиционирования измерительного модуля, включающей в себя исполнительный механизм (шаговый двигатель) с направляющими, установить на стальную плиту;

С помощью персонального компьютера и микроконтроллера привести в движение шаговый мотор и переместить модуль в центральное положение;

С помощью персонального компьютера и микроконтроллера привести в движение шаговый мотор и переместить модуль в крайнее левое положение;

С помощью персонального компьютера и микроконтроллера привести в движение шаговый мотор и переместить модуль в крайнее правое положение;

С помощью лабораторного источника питания подавать напряжение на актюатор до момента, когда индентор не коснется поверхности стальной плиты. Момент касания зафиксировать визуально;

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если удалось переместить платформу с модулем в крайние правое и левое положение, а так же визуально зафиксировать контакт наконечника с поверхностью стальной плиты, что соответствует требованиям п.4.2 Программы.

6.3 Проверка по п. 4.3 Программы выполняется следующим образом:

Прочность крепления макета системы крепления и позиционирования индентационного измерительного модуля характеризуется силой отрыва магнитных элементов, с помощью которых реализуется крепление объекта испытаний к тестируемым деталям. Проверка по п.4.3 Программы заключается в проверке силы отрыва магнитных элементов (не мене 3000 Н) от тестируемых деталей с помощью испытательной машины.

Закрепить магнитные элементы, используемые для крепления макета системы крепления и позиционирования индентационного измерительного модуля, включающей в себя исполнительный механизм (шаговый двигатель) с направляющими на стальной (железной) плите;

Полученную конструкцию поместить в рабочее поле испытательной машины РЭМ-10 и закрепить с помощью держателей;

Перевести машину испытательную в режим «Растяжение» и задать нагрузку 3000 Н;

Объект испытаний считается выдержавшим проверку в случае, если магнитные элементы остались зафиксированы на стальной плите в процессе приложения нагрузки 3000 Н, в соответствии с требованиями п. 4.3 Программы.

6.4 Проверка по п. 4.4 Программы выполняется следующим образом:

Закрепленный макет индентационного измерительного модуля в системе крепления и позиционирования измерительного модуля, включающей в себя исполнительный механизм (шаговый двигатель) с направляющими, установить на стальную плиту;

С помощью персонального компьютера и микроконтроллера привести в движение шаговый мотор и переместить модуль в крайнее левое положение;

С помощью персонального компьютера и микроконтроллера привести в движение шаговый мотор и переместить модуль в крайнее правое положение;

С помощью штангенциркуля измерить расстояние, на которое переместился модуль;

Зафиксировать полученное значение в протоколе исследовательских испытаний;

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если измеренное значение расстояния, пройденного модулем, составляет не менее 20 мм, что соответствует требованиям п.4.4 Программы.

6.5 Проверка по п. 4.5 Программы выполняется следующим образом:

С помощью лабораторного источника питания подавать напряжение на актюатор до момента, когда индентор не будет переведен в крайнее верхнее положение;

Измерить расстояние между индентором и поверхностью тестируемого объекта;

Зафиксировать полученное значение рабочего расстояния в протоколе исследовательских испытаний;

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если измеренное значение рабочего расстояния, составляет не менее 5 мм, что соответствует требованиям п.4.5 Программы.

## 7. Отчетность

7.1 Заданные и фактические данные, полученные при испытаниях по каждому пункту программы, оформляются протоколами, представляемыми на заседание комиссии. Типовая форма протокола испытаний приведена в приложении В. В согласованных случаях допускается оформлять одним протоколом данные, полученные при испытаниях по нескольким пунктам программы.

7.2 По результатам испытаний в течение 3 дней комиссией составляется акт испытаний. Акт испытаний должен содержать:

- подтверждение выполнения программы испытаний;
- оценку результатов испытаний с конкретными точными формулировками, отражающими соответствие объекта испытаний требованиям ТЗ;
- выводы по результатам испытаний;
- заключение возможности промышленного производства и реализации объекта испытаний.

К акту прилагаются протоколы испытаний по пунктам программы.

7.3 Первичные материалы испытаний хранятся на предприятии ОАО «Тяжпрессмаш» в течение 5 лет со дня окончания испытаний.

## Приложения

Приложение А    Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний

Приложение Б    Типовая форма протокола испытаний

Приложение А  
Перечень средств проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Машина РЭМ-10	1	ГРСИ № 30156-05	Наибольшая предельная нагрузка 10 кН Воспроизводимый диапазон нагрузки 0,4 – 10 кН

Допускается применять другие средства, вновь разработанные или находящиеся в обращении, аналогичные по точности.

**Приложение Б**  
**ПРОТОКОЛ**

**испытания по пункту № 4.1 - 4.5**

Программы и методики исследовательских испытаний макета системы крепления и  
позиционирования измерительных модулей iPoRTH  
RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ

№ 1

«\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2017 г.

- 1. Объект испытания:** макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH
- 2. Цель испытания:** проверка соответствия объекта испытания требованиям пункта № 4 технического задания: 4.3.1.2.12; 4.3.1.2.7
- 3. Дата начала испытания:** \_\_\_\_\_ 2017 г
- 4. Дата окончания испытания:** \_\_\_\_\_ 2017 г
- 5. Место проведения испытания:** ОАО «Тяжпрессмаш», г. Рязань, ул. Промышленная, 5.
- 6. Результаты испытания**

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
Сопрягаемость макетов системы крепления и позиционирования и индентационного измерительного модуля	-	6.1		обеспечение	
Система крепления или позиционирования должна обеспечивать взаимное перемещение измерительного блока и образца, а также подвод наконечника индентора к исследуемой поверхности на рабочее расстояние.	4.3.1.2.12	6.2		обеспечение	

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
Система крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования должна обеспечивать жесткую посадку измерительного блока на линейном трансляторе или другом исполнительном механизме, используемом для взаимного перемещения измерительного блока и исследуемого образца, а также при жесткой установке измерительного модуля на объект исследования с помощью магнитных или немагнитных систем крепления	4.3.1.2.7	6.3		обеспечение	
Латеральное перемещение измерительного индентационного модуля относительно тестируемого объекта, обеспечиваемое системой крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования	-	6.4	мм	Не менее 20	
Рабочее расстояние между индентором и поверхностью образца, обеспечиваемое системой крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования	-	6.5		Не менее 5	

## 7. Замечания и рекомендации

## 8. Выводы

### 8.1 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH, выдержал/не выдержал испытание по пункту № 4.1.-4.5 Программы и методики RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ.

### 8.2 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH, соответствует / не соответствует требованиям пункта № 4.технического задания, согласованного с государственным заказчиком.

## Испытание проводили

Должности, ФИО и подписи сотрудников, проводивших испытания.



ПРИЛОЖЕНИЕ К. АКТ И ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА СИСТЕМЫ  
КРЕПЛЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

**АКТ**  
**исследовательских испытаний**

макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей  
экспериментальных модулей экспериментального образца iPoRTH  
Соглашение 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии для финансового  
обеспечения затрат, связанных с выполнением прикладных научных  
исследований и экспериментальных разработок по лоту шифр 2017-14-579-  
0057 по теме: «Разработка конструкции портативного оборудования и  
комплекса измерительных методик для роботизированного технологического  
контроля геометрических и механических характеристик материалов и  
изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях»  
(уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0274.

«21» декабрь 2017 г.

г. Рязань

Комиссия по проведению приемочных испытаний в составе:

Заместитель главного инженера	В.В. Абрамян
Начальник цеха №2	О.П. Агафонов
Заместитель главного инженера	Н.П. Петров
Главный металлург	С.М. Хориков

назначенная приказом по ОАО «Тяжпрессмаш» от «18» сентября 2017 г. №1527А, в период с «21» декабря 2017 г. по «21» декабря 2017 г. провела исследовательские испытания макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей экспериментальных модулей экспериментального образца iPoRTH.

Испытания проведены в ОАО «Тяжпрессмаш», г. Рязань по Программе и методикам RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ.

**1. Комиссией установлено:**

- 1.1. Программа приемочных испытаний выполнена полностью.
- 1.2. Объект испытаний выдержал приемочные испытания по Программе и методикам RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ.

**2. Выводы**

Объект испытаний соответствует всем требованиям, заданным техническим заданием Соглашения 14.577.21.0274 о предоставлении субсидии для финансового обеспечения затрат, связанных с выполнением прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по лоту шифр 2017-14-579-0057 по теме: «Разработка конструкции портативного оборудования и комплекса измерительных методик для роботизированного технологического контроля геометрических и механических характеристик

материалов и изделий, применяемых в машиностроительной и атомной отраслях» (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0274.

### 3. Замечания и рекомендации

По результатам проведённых испытаний замечаний и рекомендаций нет.

Заместитель главного инженера



В.В. Абрамян

Начальник цеха №2



О.П. Агафонов

Заместитель главного инженера



Н.П. Петров

Главный металлург



С.М. Хориков

## ПРОТОКОЛ

### испытания по пункту № 4.1 - 4.5

Программы и методики исследовательских испытаний макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH  
RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ

№ 1

«21» декабря 2017 г.

- 1. Объект испытания:** макет системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH
- 2. Цель испытания:** проверка соответствия объекта испытания требованиям пункта № 4 технического задания: 4.3.1.2.12; 4.3.1.2.7
- 3. Дата начала испытания:** 21 декабря 2017 г
- 4. Дата окончания испытания:** 21 декабря 2017 г
- 5. Место проведения испытания:** ОАО «Тяжпрессмаш», г. Рязань, ул. Промышленная, 5.
- 6. Результаты испытания**

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
Сопрягаемость макетов системы крепления и позиционирования и индентационного измерительного модуля	-	6.1		обеспечение	<i>обеспечивает</i>
Система крепления или позиционирования должна обеспечивать взаимное перемещение измерительного блока и образца, а также подвод наконечника индентора к исследуемой поверхности на рабочее расстояние.	4.3.1.2.12	6.2		обеспечение	<i>обеспечивает</i>
Система крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования должна обеспечивать жесткую посадку измерительного блока на линейном трансляторе или другом исполнительном механизме, используемом для взаимного перемещения измерительного блока и исследуемого образца, а также при жесткой установке измерительного модуля на объект исследования с помощью магнитных или немагнитных систем крепления	4.3.1.2.7	6.3		обеспечение	<i>обеспечивает</i>

Наименование показателя	Пункт требований ТЗ/ТУ	Пункт методики	Ед. изм.	Номинальное значение	Измеренное значение
Латеральное перемещение измерительного индентационного модуля относительно тестируемого объекта, обеспечиваемое системой крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования	-	6.4	мм	Не менее 20	28
Рабочее расстояние между индентором и поверхностью образца, обеспечиваемое системой крепления и позиционирования измерительного модуля индентирования	-	6.5		Не более 5	4

### 7. Замечания и рекомендации

Замечаний и рекомендаций нет.

### 8. Выводы

#### 8.1 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета системы крепления и позиционирования измерительных модулей iPoRTH, выдержал испытание по пункту № 4.1.-4.5 Программы и методики RU.ЭОПРТ.00001-01 17 02 ПМ.

#### 8.2 Объект испытания:

Экспериментальный образец макета системы крепления и позиционирования измерительных индентационных модулей iPoRTH, соответствует требованиям пункта № 4 технического задания, согласованного с государственным заказчиком.

### Испытание проводили

Зам. гл. инженера

Начальник цеха №2

Зам. гл. инженера

Главный металлург

В.В. Абрамян

О.П. Агафонов

Н.П. Петров

С.М. Хориков

ПРИЛОЖЕНИЕ Л. КОМПЛЕКТ КД НА МОДЕРНИЗАЦИЮ СТЕНДА РМЦ-1000,  
АКТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ, АКТ МОДЕРНИЗАЦИИ СТЕНДА РМЦ-  
1000

Перечень разработанной конструкторской документации на печь модели  
ДГШТУ20 цеха №2:

1. Модернизация печи ДППТУ20 сборочный чертёж ДППТУ20-00-001 СБ
2. Шахта ДППТУ20-11-001
3. Привод перемещения электродов ДГШТУ20-21-001
4. Колонка ДППТУ20-31-001
5. Электродержатель средний ДППТУ20-32-001
6. Электродержатель левый ДППТУ20-33-001
7. Подвеска колонок и противовесов ДППТУ20-34-001
8. Механизм зажима электрода ДППТУ20-35-001
9. Пневмосистема ДППТУ20-41-001
10. Установка контактов измерения потенциалов средней точки  
ДППТУ20-44-0
11. Установка датчиков крайних положений колонки ДППТУ20-45-001
12. Площадка обслуживания ДППТУ20-71-001
13. Разработка шинпровода на 2-ой сводовый электрод ДППТУ20-91-  
001
14. Схема электрическая подключений силовых кабелей и кабелей  
управлен ДППТУ20-91 -001Э5
15. Установка частотно регулируемых приводов ДППТУ20-92-001
16. ДППТУ20-93-001 Шкаф установки частотно регулируемых приводов
17. 59.1413.00.000 - Кронштейн крепления рукавов свода.
18. 59.1415.00.000 - Перекрытие на прямок кессона 1200x1200 (ДППТУ-  
20).

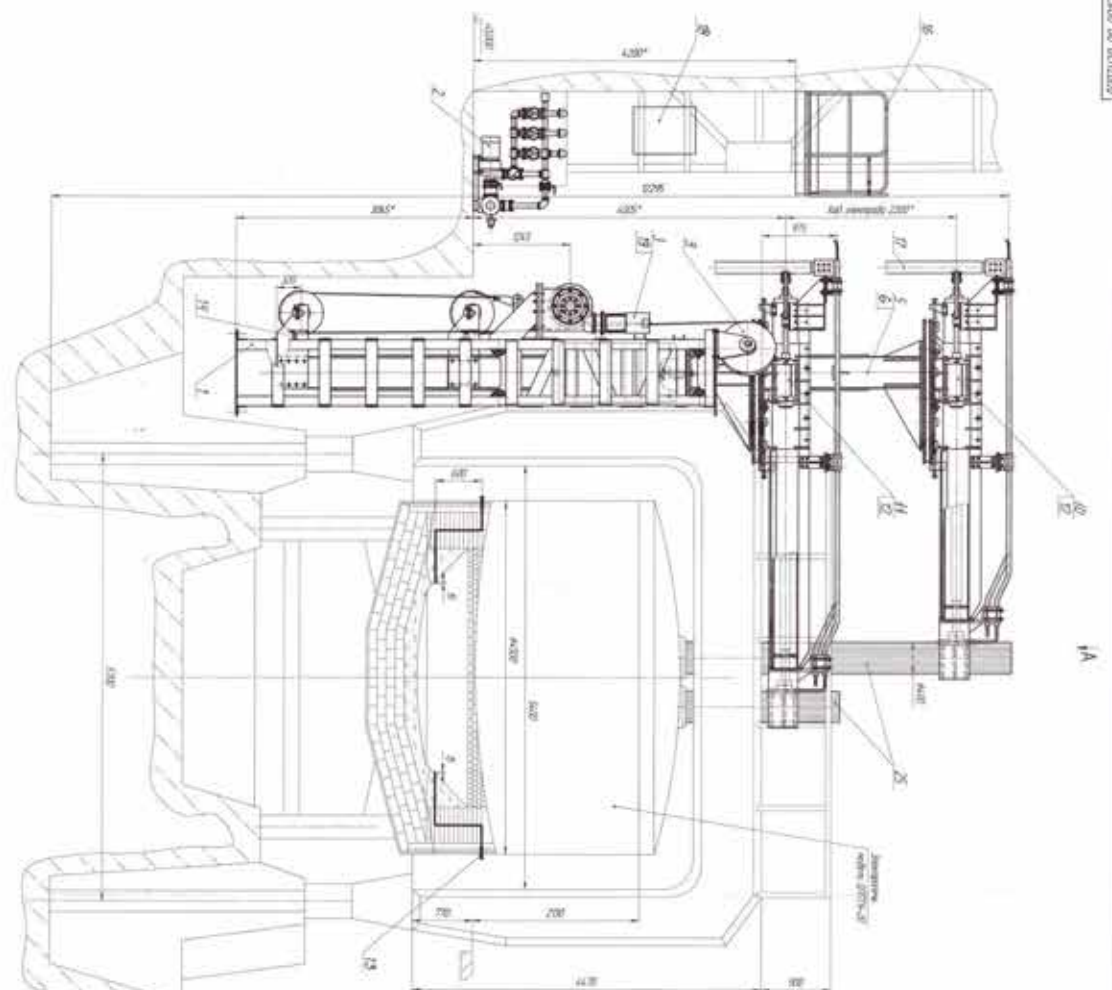
19. 59.1432.00.000 - Уст-ка концевого выключателя КУ-701 на наклон печи.
20. 59.1433.00.000 - Реконструкция гидравлической системы подключения масляных резервных насосов.
21. 59.750.07.000 А - Механизм подъема рабочего окна (доработка).
22. 59.1367.00.000 - Ограждение насосной станции свода.
23. 59.1381.00.000 - Подвод технического и оборотного водоснабжения.
24. 59.1396.00.000 - Удлинение площадки обслуживания печи ДППТУ-20.
25. 59.1398.00.000 - Ограждение приемка печи ДППТУ-20.
26. 59.1409.00.000 - Дымоудаление.
27. Зам. гл. инженера
28. 59.1412.00.000 - Лестница на площадку для обслуживания задвижек.
29. Свод водоохлаждаемый ДППТУ20-51-001
30. Разработка трубопровода охлаждения ДППТУ20-23-001
31. Разработка схемы гидравлической принципиальной ДППТУ20-00-001ГЗ
32. Разработка гидравлической станции ДППТУ20-21-001
33. Свод водоохлаждаемый с двумя сводовыми электродами ДППТУ20-51.1-001 СБ
34. Разработка кольца бетонного свода водоохлаждаемого с двумя сводовыми электродами ДППТУ20-52.1-001
35. Разработка кольца бетонного с одним сводовым электродом для свс водоохлаждаемого с двумя сводовыми электродами ДППТУ20-52.1-001
36. ДГ1ПТУ20-00-001ЭЗ Схема электрическая принципиальная
37. ДППТУ20-00-001ПЭЗ Перечень элементов
38. ДППТУ20-92-001 Шкаф управления
39. ДППТУ20-00-001РЭ1 Руководство по эксплуатации
40. РТО-00.1-001ЭЗ Схема электрическая принципиальная
41. РТО-00.1-001ПЭЗ Перечень элементов

42. РТО-92.1-001 Шкаф управления
43. РТО-00.1-001 АЭ Алгоритмы электроавтоматики
44. РТО-00.1-001РЭ1 Руководство по эксплуатации
45. РТО-00-001 Теплообменный агрегат

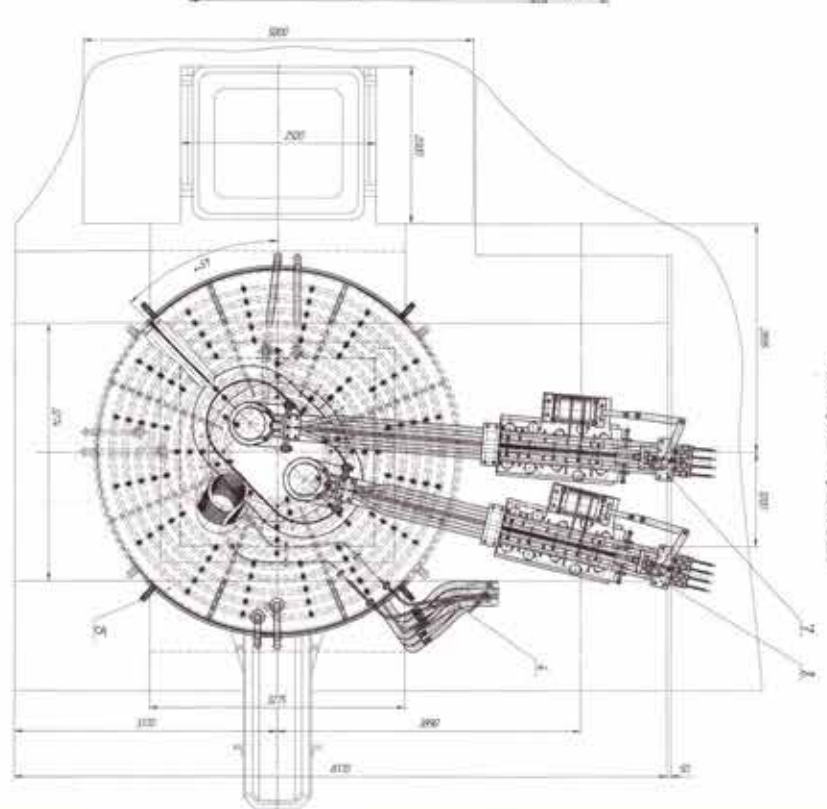


507750-00-01E5

20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100



A-A

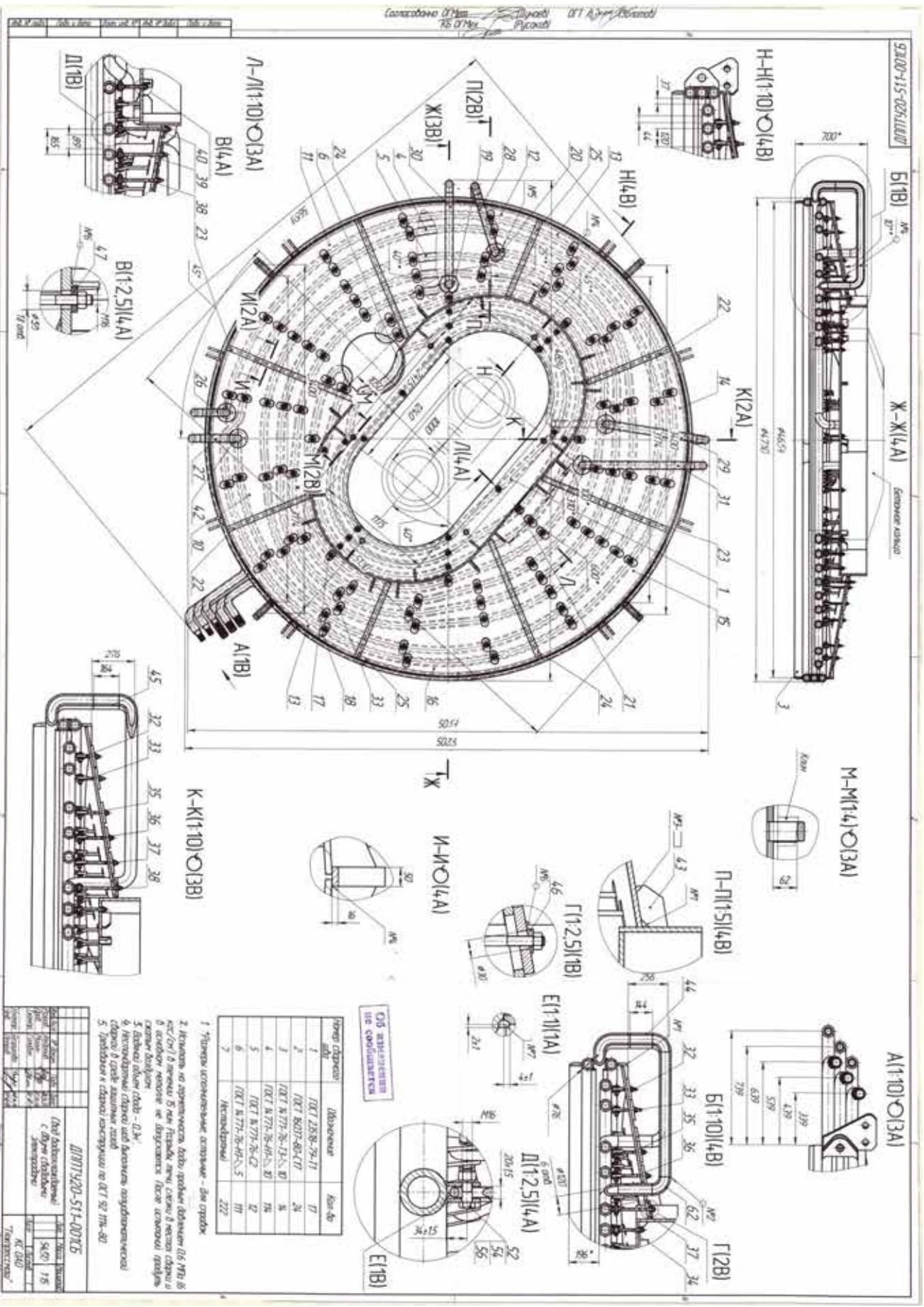


A-A  
Detailed view of the system and its parts or sensors

507750-00-01E5	REV	DATE	BY	CHKD
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	8			
	9			
	10			

Thema: ...





1. Упоры изготовлены из стали - для гладких
2. Изготовлен по чертежам, ввиду отсутствия данных ГОСТ 915-81 (ГОСТ 915-81) в металле. В металле литье, стальной и литейный металл не допускаются. После изготовления гладких упоров допуск - 0,04.
3. Изготовлены из стали и алюминия по чертежам, ввиду отсутствия данных в металле литье, стальной и литейный металл не допускаются. После изготовления гладких упоров допуск - 0,04.
4. Изготовлены из стали и алюминия по чертежам, ввиду отсутствия данных в металле литье, стальной и литейный металл не допускаются. После изготовления гладких упоров допуск - 0,04.
5. Изготовлены из стали и алюминия по чертежам, ввиду отсутствия данных в металле литье, стальной и литейный металл не допускаются. После изготовления гладких упоров допуск - 0,04.

№ п/п	Обозначение	Мат-л
1	ГОСТ 2358-79-11	П
2	ГОСТ 8607-80-11	А
3	ГОСТ 8778-78-13-А, В	А
4	ГОСТ 8778-78-13-В, Д	А
5	ГОСТ 8778-78-13-С, Е	А
6	ГОСТ 8778-78-13-Д, Е	А
7	ГОСТ 8778-78-13-С, Е	А

ОБЪЕКТЫ  
ПО СООБЩЕНИЮ

ЛННП.920.514.007С

Дат. дозв. на изготовление: 04.01.15

С. дозв. на изготовление: 04.01.15

И. дозв. на изготовление: 04.01.15

М. дозв. на изготовление: 04.01.15

Л. дозв. на изготовление: 04.01.15

К. дозв. на изготовление: 04.01.15

З. дозв. на изготовление: 04.01.15

И. дозв. на изготовление: 04.01.15

С. дозв. на изготовление: 04.01.15

М. дозв. на изготовление: 04.01.15

Л. дозв. на изготовление: 04.01.15

К. дозв. на изготовление: 04.01.15

З. дозв. на изготовление: 04.01.15

«Согласовано»

Главный инженер  
В.А.Сорокин

«15» ноября 2017г.

«Утверждаю»

Генеральный директор  
А.М. Володин

«15» ноября 2017г.

Акт изготовления

оснастки для модернизации стенда РМЦ-1000

«15» ноября 2017 г.

г. Рязань

Комиссия в составе:

председатель	Зам.главного инженера	В.В. Абрамян
члены комиссии	Главный металлург	С. М. Хориков
	Зам. главного металлурга	А.Ю. Дунаев
	Начальник цеха № 2	О.П.Агафонов,

составила настоящий акт о нижеследующем:

**1. Комиссии предъявлены:**

- 1.1 Оснастка для модернизации стенда РМЦ-1000 в количестве 1 шт.
- 1.2 Конструкторская документация на оснастку для модернизации стенда РМЦ-1000 с составе:
  - РМЦ 1000-40-009/401 изложница

**2. В результате проверки установлено:**

- 2.1. Оснастка изготовлена ОАО «Тяжпрессмаш» в период с 2 октября 2017 г. по 13 ноября 2017 г. в соответствии с документацией на объект испытаний (РМЦ 1000-40-009/401 изложница) в комплектности, установленной техническим заданием.

**3. Вывод**

Оснастка пригодна для проведения работ по модернизации стенда РМЦ-1000.

Председатель

Члены комиссии

В.В. Абрамян

С.М. Хориков

А.Ю. Дунаев

О.П. Агафонов

«Согласовано»

Главный инженер  
  
В.А.Сорокин  
«29» декабря 2017г.

«Утверждаю»

Генеральный директор  
А.М. Володин  
«29» декабря 2017г.  


**Акт  
выполненных работ от 29.12.17г.**

Мы, нижеподписавшиеся, зам. гл. инженера Абрамян В.В., главный энергетик Кучер И.В., начальник цеха №11 Трухачев В.А., начальник цеха №12 Козлов А.А. с одной стороны, и главный металлург Хориков С.М., начальник цеха №2 Агафонов О.П., с другой, составили настоящий акт в том, что выполнена модернизация стенда РМЦ-1000 для изготовления образцов крупногабаритных труб (модернизация печи ДППТУ-20, входящей в состав стенда).

Работы выполнены в полном объеме, замечаний нет.

**Сдал:**

Зам. гл. инженера


Абрамян В.В.

Главный энергетик

Кучер И.В.

Начальник цеха №11



Трухачев В.А.

Начальник цеха №12



Козлов А.А.

**Принял:**

Главный металлург


Хориков С.М.

Начальник цеха №2

Агафонов О.П.