

DOI 10.58351/2949-2041.2026.34.5.003

Подколзин Даниил Дмитриевич, магистрант
Дальневосточный федеральный университет

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Аннотация. В статье представлены результаты проектирования и расчёта корпуса телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) с рабочей глубиной 15 метров. Проведён прочностной анализ цилиндрической обечайки из алюминия 1060, подобран материал уплотнительного кольца, обоснована конструкция рамного корпуса из полипропилена. Разработана технология изготовления рамы на фрезерном ЧПУ и крепёжных элементов методом 3D-печати из ABS-пластика.

Ключевые слова: Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, прочный корпус, 3D-печать, полипропилен, уплотнительное кольцо, аддитивные технологии.

Современные телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) являются ключевыми инструментами для решения задач подводной инспекции, обслуживания морской инфраструктуры и научных исследований. Как отмечается в аналитическом обзоре [1] на отчёт Research and Markets, мировой рынок подводной робототехники активно развивается, что обусловлено растущим спросом на обслуживание оффшорных ветроэлектростанций и нефтегазовых месторождений. В России этот рынок развивается в рамках реализации программы «Цифровая экономика», где особое внимание уделяется созданию отечественных подводных робототехнических комплексов [2].

Целью настоящей работы является разработка и обоснование конструкции корпуса ТНПА, оптимизированной по критериям прочности, гидродинамических характеристик и технологичности изготовления, с последующей экспериментальной проверкой на прототипе, выполненном методом аддитивного производства (3D-печать).

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСА ТНПА

2.1 Техническое задание

Целью работы является разработка корпуса телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с заданной рабочей глубиной, описание общих представлений о необитаемых подводных аппаратах, нахождение методики расчета, описание процесса производства для улучшения и применения тех инженерных навыков, которые были приобретены за время обучения в Морском Государственном Университете им. Г. И. Невельского.

Технические параметры формируются из необходимости выполнять поставленные задачи для команды по подводной робототехнике МГУ им. Г. И. Невельского, а именно:

- Рабочая глубина 15 метров;
- Модульность корпуса для возможности дальнейшего улучшения;
- Использовать материалы и средства изготовления доступные в лаборатории.
- Технические системы, необходимые предусматривать для размещения в корпусе: камера, манипулятор, движители.

В качестве прочного корпуса используется цилиндрическая колба, изготовленная в Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, для неё необходимо произвести прочностной анализ и рассчитать рабочую глубину.

2.2 Анализ прочного корпуса

Прочный корпус ТНПА состоит из 3 элементов:

- Цилиндрической обечайки;
- Глухой крышки;
- Распределительной крышки.



Для цилиндрической формы прочного корпуса необходимо рассчитать устойчивость и прочность для обечайки, критическое давление для уплотнительной резинки и местные мембранные напряжения для распределительной крышки. Всё это даст понимание рабочей глубины и условий, при которых может эксплуатироваться ТНПА.

2.2 Расчет обечайки

Для определения максимального внешнего давления, которое может выдержать обечайка, нужно проверить её на устойчивость (риск потери устойчивости, смятие) и прочность (разрушение от напряжений).

Исходные данные:

Материал – сплав алюминия 1060, его характеристики:

Таблица 2.1

Свойства материала алюминий 1060

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	69000	Н/мм ²
Коэффициент Пуассона	0,33	
Модуль сдвига	27000	Н/мм ²
Массовая плотность	2700	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	68,94	Н/мм ²
Предел текучести	27,57	Н/мм ²
теплопроводность	200	W/ (м·K)

Геометрические параметры обечайки (как вставлять ссылки на чертеж?)

Длина, L = 179 мм

Толщина стенки, t = 3 мм

Внешний диаметр, D = 108 мм

Внутренний диаметр, d = 102 мм

Средний радиус, R = (D + d)/4 = (108 + 102)/4 = 52.5 мм.

2.2.1 Проверка на устойчивость

Обечайка может потерять устойчивость (сложиться) под действием внешнего давления. Исходя из понимания, что деталь представляет собой тонкостенный цилиндр (поскольку отношение толщины стенки к радиусу внутреннего диаметра много меньше единицы) используем формулу для тонкостенных цилиндров:

Критическое давление по формуле (по формуле Папковича-Флапана)

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{L}{\pi \cdot R}\right)^4}\right) = \frac{2 \cdot 69 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{3}{108}\right)^3}{1 - 0,33^2} \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{179}{3,14 \cdot 51}\right)^4}\right) = 1,39 \text{ МПа}$$

Исходя из ГОСТ 14249-89 под расчетным давлением в рабочих условиях для элементов сосудов и аппаратов следует понимать давление, на которое проводится их расчет на прочность, вычисляется по формуле:

$$P_{дон} = \frac{P_{cr}}{k}$$

Где k – коэффициент запаса прочности.

принимая максимальный коэффициент запаса 3 для пластичных материалов, таким образом допустимое давление рассчитываем:

$$P_{дон} = \frac{1,39}{3} = 0,46 \text{ МПа (4,6 атм)}$$

2.2.2 Проверка на прочность (кольцевые напряжения)

При внешнем давлении P в стенке возникают кольцевые напряжения σ_θ , равное:



$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot R}{t}$$

Предельное давление (по пределу текучести):

$$P_{max} = \frac{\sigma_y \cdot t}{R} = \frac{27 \cdot 3}{52,2} = 1,54 \text{ МПа (15,4 атм)}$$

Поскольку устойчивость слабее прочности (0,46 МПа < 1,54 МПа), предел определяется по устойчивости.

Таким образом обечайка может выдержать давление, равное 0,46 МПа без необратимых последствий, для определения рабочей глубины $h_{раб}$ необходимо помнить, что гидростатическое давление $P_{гид}$ увеличивается каждые 10 метров на 0,1 МПа, а атмосферное давление $P_{атм}$ равно 0,1 МПа. Таким образом:

$$h_{раб} = \frac{(P_{доп} - P_{атм})}{P_{гид}} = \frac{(0,46 - 0,1)}{0,1} = 36 \text{ м.}$$

С помощью инструмента среды моделирования SolidWorks SimulationExpress (рис. 2.1), проверяем расчет и видим, что ни одна точка на обечайки не достигает до своего предела текучести. Желтой зоной выделены канавки, которые служат для фиксации всего жесткого корпуса, но они так же не доходят до критических значений.

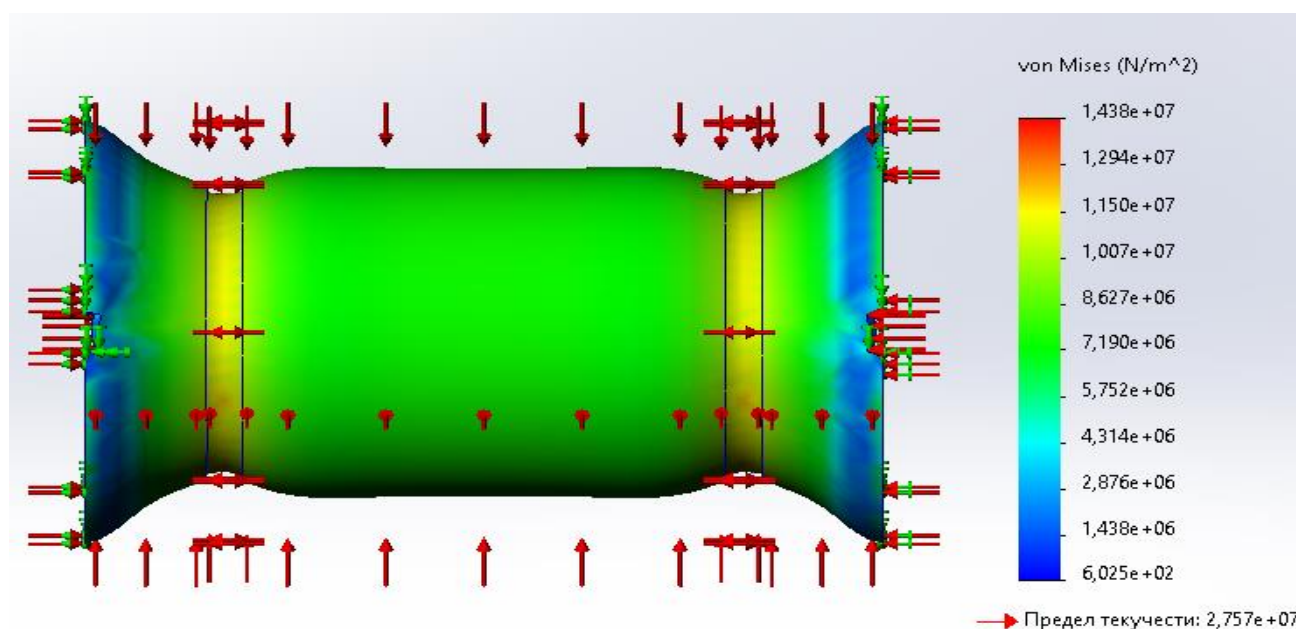


Рис.2.1 степень достижения предела текучести точек обечайки

2.3 Расчет уплотнительного кольца

Поскольку в герметизирующих крышках проточены канавки размером 2x2 мм, необходимо подобрать уплотнительное кольцо с таким параметрами, чтобы она выдерживала давление $P_{доп}$.

Таблица 2.2

Условия эксплуатации

Рабочее давление	0,46 МПа
Среда	Морская и пресная вода
Температура	20-50 оС

Геометрия уплотнения представляет собой канавку с глубиной 2 мм и шириной 2 мм, по 0,5 мм закругления (рис.2.2). Исходя из этого, диаметр резинки должен быть подобран так, чтобы степень сжатия была в диапазоне 15-30% согласно ISO 3601-1 для статистических уплотнений.

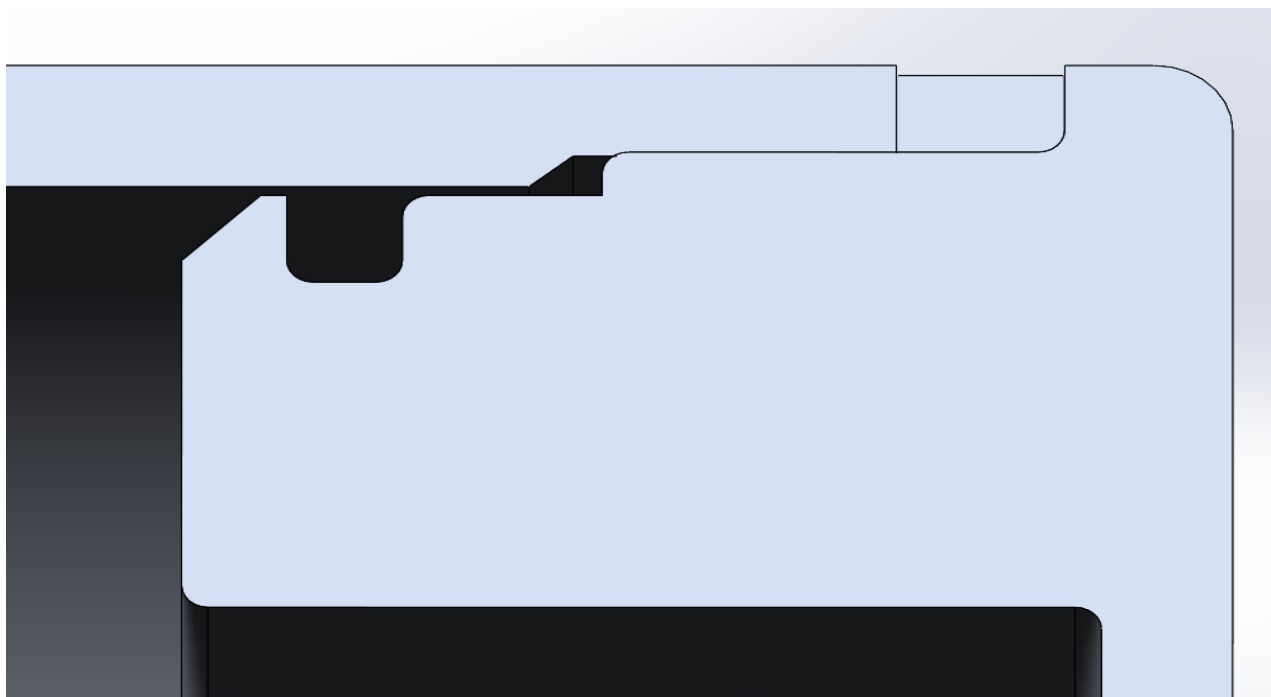


Рис.2.2 Геометрия канавки для уплотнительной резинки

Произвольно берем кольцо диаметром 2,5 мм, степень сжатия ε рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{d - h}{d} \cdot 100\% = \frac{2,5 - 2}{2,5} \cdot 100\% = 20\%$$

Где d – диаметр сечения резинки;
 h – высота канавки.

Степень сжатия составляет 20%, что соответствует рекомендуемому диапазону 15–30% для статических уплотнений.

2.3.1 Выбор материала

Для обеспечения герметичности контактное давление (P_k) от сжатия резинки должно превышать рабочее давление (P):

$$P_k > P = 0,46 \text{ МПа}$$

Для уплотнительного кольца контактное давление согласно ISO 3601-1:

$$P_k = 0,2 \cdot E,$$

где E – модуль упругости резины (зависит от твёрдости по Шору). Для выполнения условия необходимо подобрать материал, который имел бы модуль упругости минимум 2,3 МПа, поскольку допускается возможность погружения при маневрировании, стоит подобрать материал с запасом упругости в 2 раза. Возможные варианты представлены в таблице:

Таблица 2.3

Свойства материалов для уплотнения

Материал	Твердость (Шор А)	Диапазон температур (°C)	Стойкость к воде	Макс. Давление (МПа)	Стандарты
NBR 60	60A	-30...+100	Отличная	10-15	ГОСТ 7338-90, ISO 3601-1
NBR 80	80A	-30...+100	Отличная	15-20	
NBR 90	90A	-30...+100	Отличная	20-30	
EPDM 70	70A	-30...+100	Отличная	8-12	



Выберем NBR 60 (нитрильный каучук) с твердостью 60А, модуль упругости равен 5МПа, тогда

$$P_k = 0,2 \cdot E = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ МПа},$$

Что удовлетворяет условиям герметичности.

2.3.2 Проверка на экструзию

При давлении резина может выдавливаться в зазор. Условие предотвращения экструзии:

$$P < \frac{G}{k}$$

где G – минимальный зазор между деталями (в данном случае 0 мм, так как канавка полностью закрывает резинку). k – коэффициент безопасности (0,1–0,5). Поскольку зазор 0, экструзии не произойдет.

В результате было выбрано уплотнительное кольцо с внутренним диаметром 100 мм и сечением 2,5 мм. Согласно ISO 3601-1 обозначается как 2,5×100 NBR 80, согласно ГОСТ 9833-73: уплотнение 2,5-100-1 NBR.

2.4 Рамный корпус

Для расположения всех главных элементов ТНПА необходим несущий рамный корпус. При разработке рамы особое внимание было уделено её массогабаритным характеристикам, простоте в обслуживании и легкости конструкции.

В качестве основного материала для изготовления корпуса ТНПА была выбрана полипропеленовая пластина толщиной 8 мм. Учитывая полезную нагрузку, которая крепится к корпусу этот материал является лёгким, устойчив к коррозии, обладает достаточной прочностью и является не дорогим. Более подробные свойства полипропилена указаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Характеристика материала

характеристика	Описание
Химическое название	Полипропилен
Формула	(-CH ₂ -CH (CH ₃)-) _n
Плотность	0,9-0,92 г/см ³
Температура плавления	165-174 °С
Температура стеклования	-18 °С
Предел прочности при растяжении	27-35 МПа
Модуль упругости при растяжении	1000-1200 МПа
Относительное удлинение при разрыве	100-300%
Твердость по Шору	D60-D80
Водопоглощение	0,01-0,05%

Корпус ТНПА был спроектирован в программе SolidWorks 2023 согласно ГОСТ 2.052-2015. Состоит из основной плоской пластины размера 620x620 мм, расположенной горизонтально (рис 2.3), с вырезанными отверстиями для крепления полезной нагрузки и двумя плоскими пластинами с размерами 258x548,2 мм, которые крепятся перпендикулярно к основной пластине и служат опорой аппарату.

Рама была спроектирована с учётом следующих требований:

- полезной нагрузки;
- количества движителей и их схемы расположения.

В качестве полезной нагрузки на ТНПА будет располагаться камера и манипулятор, Движительно-рулевая группа, состоящая из 8 бесколлекторных трёхфазных движителей: 4 горизонтальных, расположенных под углом в 45 градусов (по схеме falcon) и 4 вертикальных. Такое расположение движителей даёт ТНПА большую манёвренность под водой, так как он имеет возможность двигаться по всем осям.



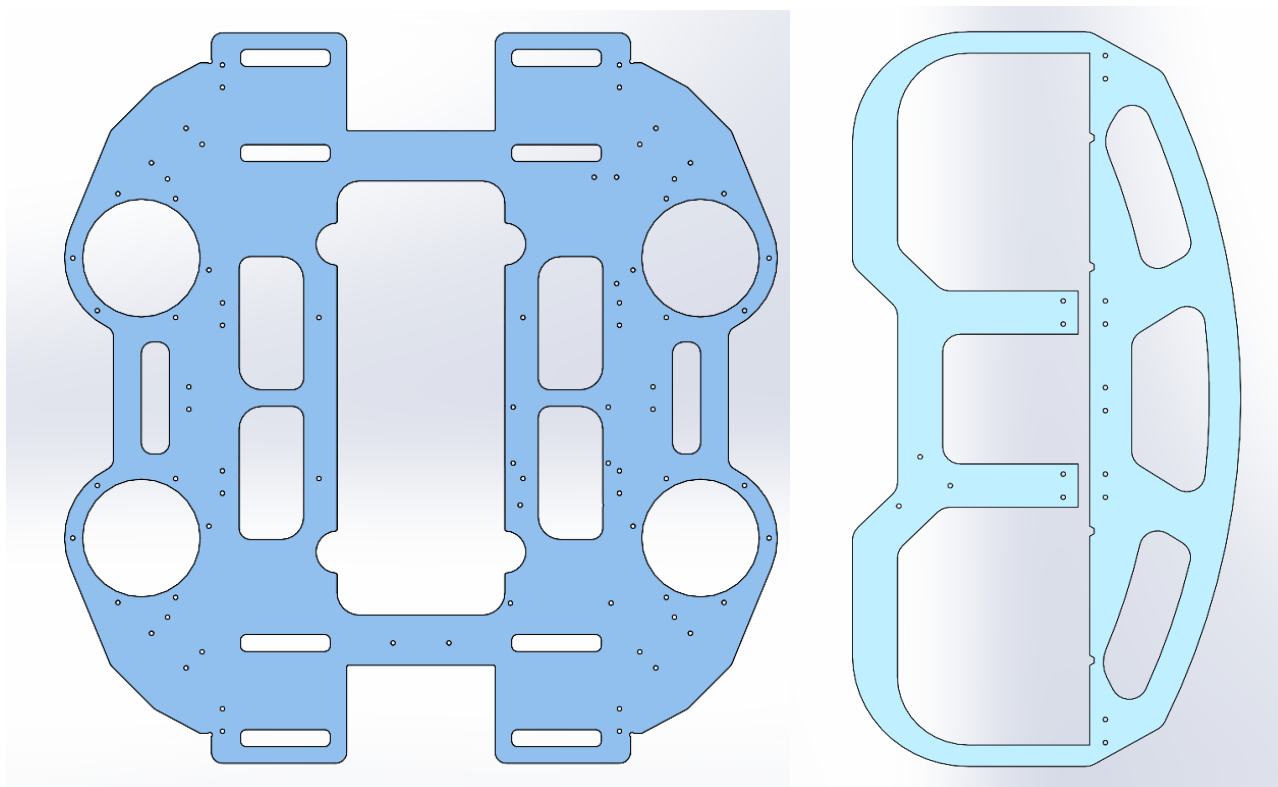


Рис. 2.3 Основная и боковая рама

2.5 Крепежи полезной нагрузки

Для правильного расположения элементов полезной нагрузки необходимы уникальные крепежи, поэтому в программе SolidWorks 2023 были спроектированы крепежи камеры, колбы с электроникой, манипулятора, а также уголки для фиксации рамных пластин.

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

3.1 Закупка материала

Предварительно был куплен лист полипропилена plast eco со следующими характеристиками:

Таблица 3.1

Характеристика заготовки

Материал заготовки	Полипропилен
Толщина заготовки	8 мм
Размер заготовки	1500 x 3000 мм
Требуемая точность обработки	$\pm 0,1$ мм

Для расположения листа на рабочей поверхности станка лист обрезали до размеров 630 x 1200, с учетом, что необходимо минимум 10 мм отступа для зажима заготовки на столе.

3.2 Оборудование и оснастка

Фрезеровочные работы проводились на фрезерном ЧПУ станке CNC-80130ASP согласно требованиям проведения фрезеровочных работ [ГОСТ Р 71363-2024].

Основные технические характеристики станка представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1

Характеристики CNC-80130ASP

Материал станины станка	Чугун
Рабочая область	800*1300*165 мм
Максимальная высота заготовки	190 мм (опционально 250мм)
Размер стола	800*1200 мм



Направляющие	профильный рельс 20мм X/Z, 25мм Y
Дискретность позиционирования	0,001мм
Точность позиционирования	0,02мм/200мм
Прямолинейность хода осей X,Y,Z	0,03мм/200мм
Перпендикулярность хода осей X,Y,Z	0,03мм/200мм
Максимальная скорость перемещений	4000мм/мин
Масса	270 кг

В качестве управляющей программы использовалась наиболее распространенная программа MACH 3. Данный продукт позволяет производить обработку на станках с количеством управляемых координат до 5. Программа позволяет, как загружать файлы с G-кодами из различных редакторов, так и заносить их вручную

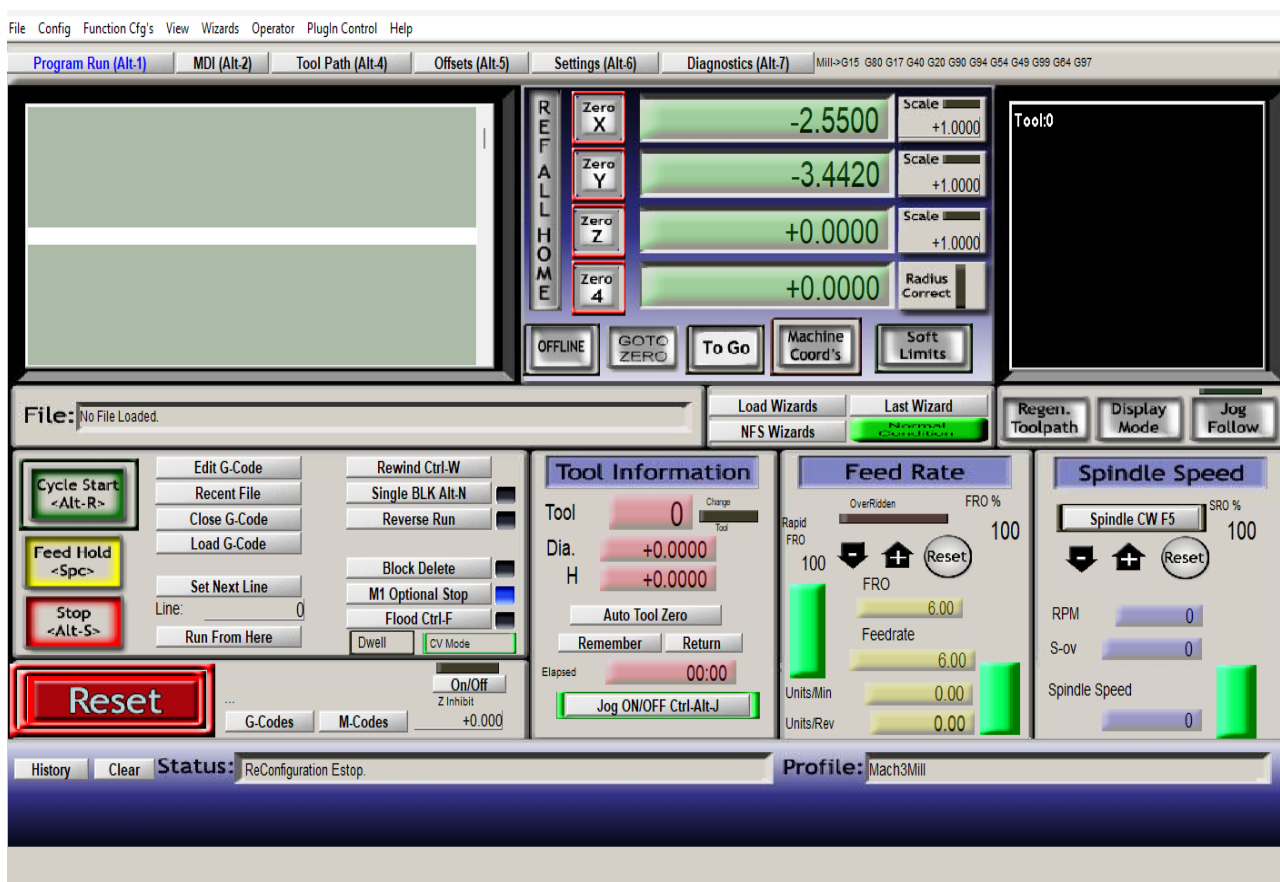


Рис.3.1 Интерфейс MACH 3

В данном примере использовался графический редактор ArtCAMPro от компании Delcam. Для более наглядного описания была составлена управляющая программа гравировки надписи. Размер рабочего поля 800 на 1200 мм. Материал заготовки – полипропилен.

В качестве рабочего инструмента использовали фрезу спиральную однозаходную стружка вверх-вниз (3.175x15x37 мм) применяется для обработки: пластика, акрила, оргстекла, ПВХ, композита, древесины мягких и твердых пород, ДСП, МДФ, ЛДСП и фанеры.

Геометрия фрезы специально разработана чтобы одновременно отводить стружку вверх и вниз, что позволяет прижать материал к рабочему столу станка ЧПУ и получить чистую кромку сверху заготовки и одновременно часть стружки отводить вверх, чтобы уменьшить нагрузку на фрезу и на станок. Длинная канавка фрезы позволяет получить длинную стружку, которая препятствует забиванию фрезы и не допускает ее перегрев, что увеличивает срок службы режущего инструмента.

Таблица 3.2

Параметры фрезы	
Тип	спиральная
Вид	концевая
Внешний диаметр	3.175 мм
Диаметр хвостовика	3.175 мм
Рабочая высота	15 мм
Общая длина	37 мм
Сплав	Вольфрам и кобальт

Таблица 3.2

Описание основных команд управляющей программы

№ команды	Описание команды
G90	Абсолютное позиционирование (отсчет всех координат, относительно одной нулевой точки в единой системе исчисления)
G49	Отмена коррекции на длину инструмента.
M3 S12000	Направление вращения шпинделя – по часовой стрелке.
G0 X42.090 Y31.754 Z5.000	Ускоренное перемещение в заданную точку.
G1 Z-0.100 F60000	Перемещение по прямой линии в заданную точку на указанной скорости подачи.
M05	Остановка шпинделя.

3.3 Подготовка к фрезеровке

Для подготовки к фрезерованию был подложен лист фанеры 10 мм толщиной, для предотвращения повреждения рабочего стола станка в случае углубления фрезы более чем на глубину заготовки.

Для базирования были выбраны деревянные зажимы, поскольку полипропилен мог повредиться под металлическими введу своей мягкости, схема базирования представлена на рисунке 3.2.

Сама заготовка была предварительно очищена от заводской пленки. Перед началом фрезеровки был проведен осмотр и проверка на отсутствие деформаций заготовки и надежность закрепления. Общее время обработки составило 1 час 35 минут (Рис. 3.3).

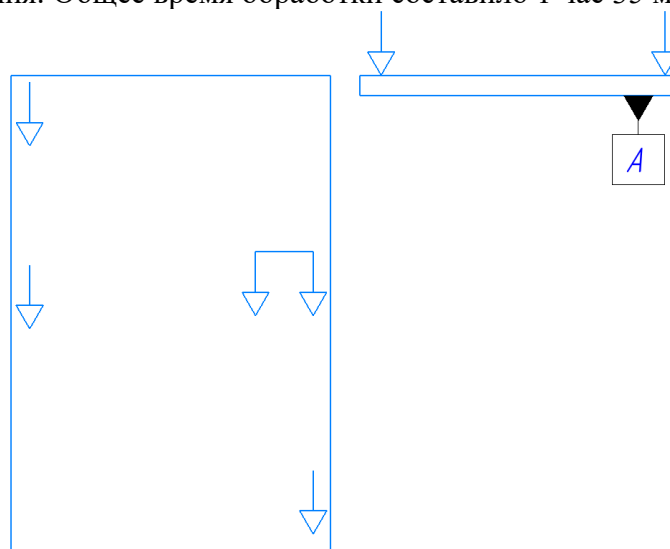


Рис.3.2 Схема базирования листа

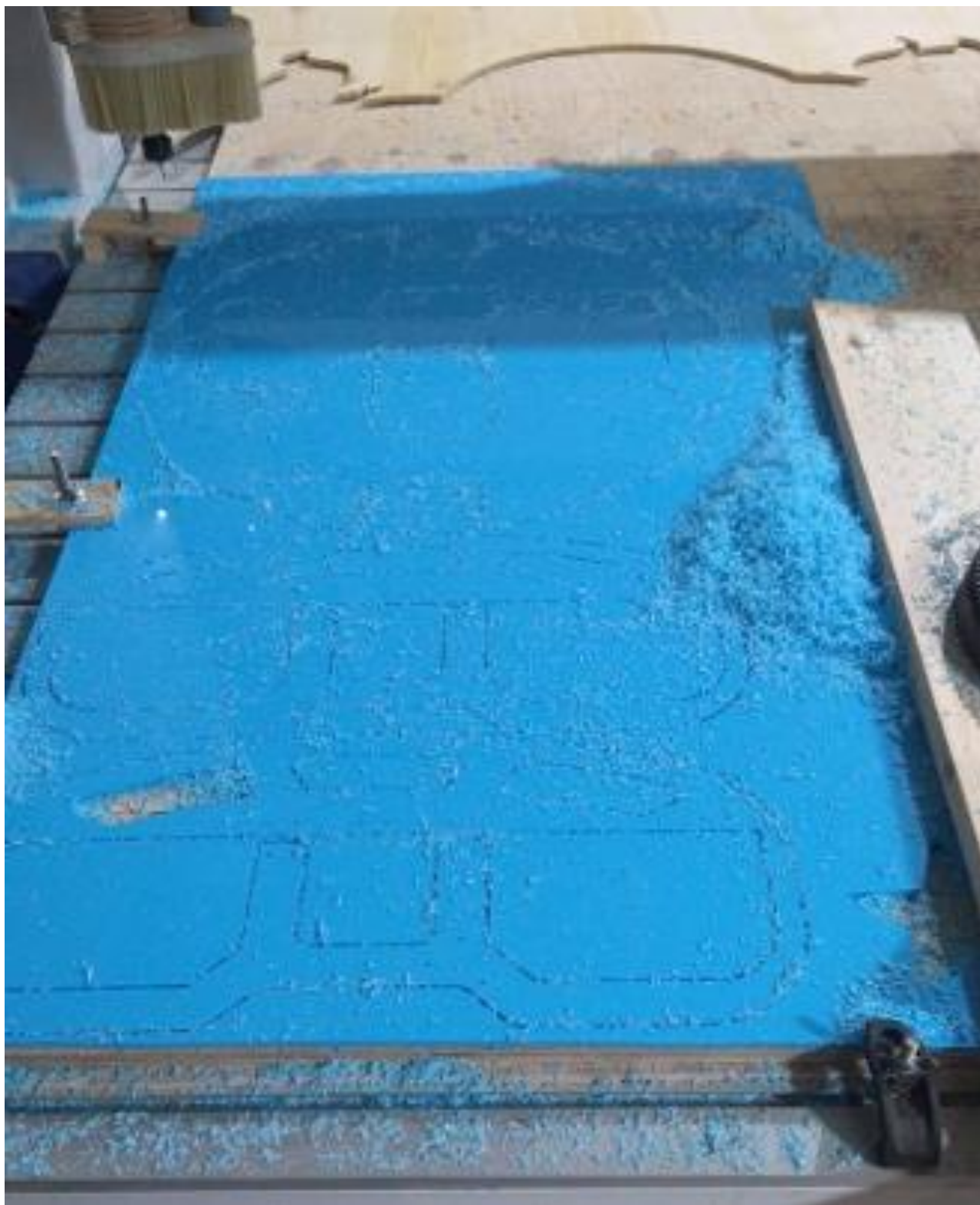


Рис.3.3 Вырезанная рама

3.4 Печать на 3D принтере

Для выполнения аддитивных работ необходимо задать требования к напечатанным изделиям [ГОСТР 57586 – 2017]. Для работы на глубине 36 метров крепежные элементы должны обладать:

- Гидрофобностью (низкое водопоглощение);
- Прочностью на сжатие и растяжение;
- Химической стойкостью к морской воде.

Печать осуществляется на принтере Designer XL S2 (рис.3.4), который поддерживает высокотемпературные пластики, что расширяет выбор материалов.



Рисунок 3.4 Designer XL S2

Таблица 3.3

Параметры принтера

Материал печати	Пластиковая нить
Технология печати	FDM / FFF
Корпус принтера	Закрытый
Кол-во печатающих сопел	1 шт.
Температура экструдера	430 °С
Температура стола	150 °С
Температура камеры печати	90 °С
Область печати	360x360x610 мм
Направляющие	Рельсы
Калибровка	Полуавтоматическая
Скорость печати / выращивания	до 130 см ³ /час
Толщина слоя	от 0,01 мм
Сопло	0.5 мм (0.3, 0.5, 0.8 мм)
Поддерживаемые материалы	ABS, ASA, FLEX, Flex (TPE), Flex (TPU), HIPS, Nylon, PEEK, PA, PSU, PC, PETG, PLA, PMMA, PP, PPS, PS, PVA, RUBBER, SBS, TPU, WOOD

Исходя из тех видов пластика, которые имелись в лаборатории, мы проанализировали их физические свойства и цену, чтобы определить рентабельность выбранного материала.

Таблица 3.4

Сравнение подходящих пластиков

Материал	Плотность (г/см) ³	Предел прочности (МПа)	Водопоглощение (% за 24 ч)	Температура эксплуатации (°C)	Цена (руб/кг)
PETG	1.27	50-60	0.1-0.2	-40...+70	800-1200
ABS	1.04	40-50	0.2-0.4	-20...+80	600-900
Nylon (PA6)	1.13	70-90	1.5-2.5	-40...+100	1500-2000

Исходя из этого, был выбран ABS как самый доступный, минимально удовлетворяющий по характеристикам пластик.

Модель, созданная в программе SolidWorks 2023 была импортирована в AMF файл, согласно стандартам аддитивных работ [ГОСТ Р 57591 – 2017] и обработана в слайсере Polygon X.

Позиционирование на рабочем столе было произведено с целью минимизировать количество поддержек, для печати, а также параллельное расположение слоев относительно нагрузки, которую должен испытывать крепеж [ГОСТ Р 59585 – 2021].

3.5 Герметизация разъемов

Для того, чтобы герметизировать электронику в колбе необходимо герметичное подключение всех систем. Для этого мы используем пенетраторы, которые предварительно заливаем эпоксидной смолой для герметизации.



Рис. 3.5. Гермоввод

Чтобы подготовить провод к заливке необходимо следовать следующей инструкции:

- Снять оплетку с кабеля;
- Ошкурить края кабеля (примерно 1.5 см) и обезжирить;
- Обезжирить внутреннюю часть пенетратора;
- Вставить кабель и закупорить узкую часть пенетратора с помощью термокля;

Смешав компоненты эпоксидной смолы в соотношении 1:4 залить пенетрат с помощью шприца и оставить засыхать на 12 часов.

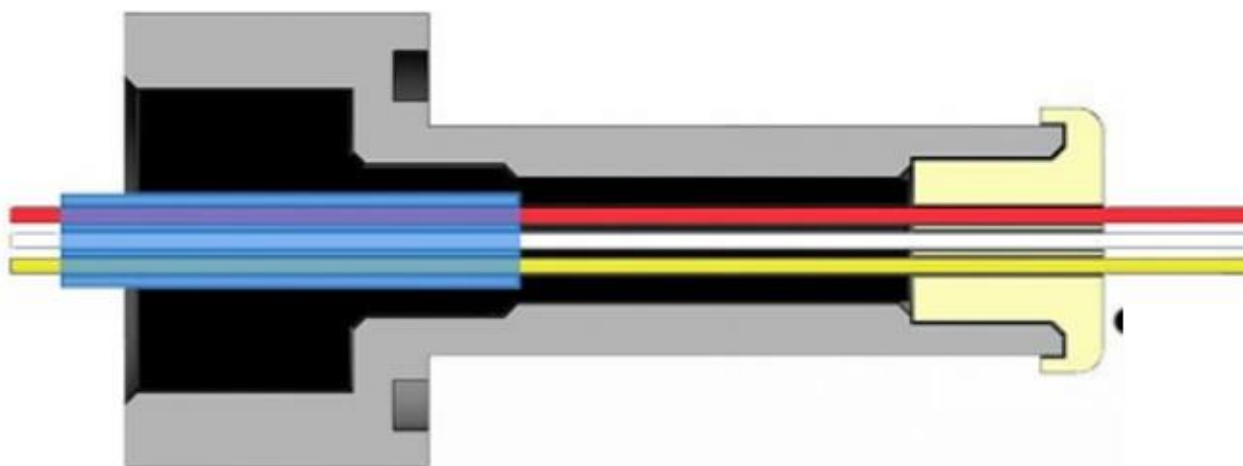


Рис.3.6 Схема заливки пенетрата
(черным выделена область заполнения эпоксидной смолой)

Список литературы:

1. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – Введ.1990-01-01. – М.:Издательство стандартов, 1989. – 28 с.
2. ISO 3601-1:2012. Fluid power systems – O-rings – Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation identification code. – Geneva: ISO, 2012. – 12 p.
3. ГОСТ 9833-73. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. – Введ. 1975-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 14 с.
4. ГОСТ 2.052-2015. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. – Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 16 с.
5. ГОСТ Р 71363-2024. Станки фрезерные с числовым программным управлением. Технические требования и методы испытаний. – Введ. 2025-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 24 с.
6. ГОСТ Р 57586-2017. Аддитивные технологии. Термины и определения. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартиформ, 2017. – 12 с.
7. ГОСТ Р 57591-2017. Аддитивные технологии. Форматы файлов для обмена данными. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартиформ, 2017. – 8 с.
8. ГОСТ Р 59585-2021. Аддитивные технологии. Методы контроля механических свойств образцов, изготовленных послойным синтезом. – Введ. 2021-09-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.