

УДК 681.5

Автоматизация модуля гидроабразивной резки заготовок из титановых листов для изготовления шар-баллонов

Матвеев Степан Сергеевич

Жаргалова Аягма Дашибалбаровна (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено проектирование и автоматизация модуля гидроабразивной резки титановых листов, предназначенного для производства заготовок шар-баллонов, применяемых в ракетно-космической промышленности. Проведен анализ существующих технологий резки, выполнен выбор оборудования, разработан алгоритм работы модуля, реализована система управления и создана компоновочная схема гибкой производственной ячейки. Описаны все ключевые этапы — от анализа требований до реализации системы в едином модуле.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, автоматизация, шар-баллон, титан, система управления, робот-манипулятор, ЧПУ

Введение. Современная ракетно-космическая техника предъявляет высокие требования к компонентам топливных систем, в частности — к шар-баллонам, используемым для хранения компонентов топлива. Одним из ключевых этапов их изготовления является точная и чистая резка заготовок из титановых листов. В связи с этим задача автоматизации процесса резки приобретает особую актуальность. Автоматизация позволяет обеспечить высокую точность, стабильность процесса и сокращение временных и трудовых затрат. В работе подробно рассмотрен процесс создания автоматизированного модуля гидроабразивной резки, его состав, логика работы, выбор оборудования и ожидаемые результаты [1].

Обоснование выбора метода резки. В процессе выбора оптимальной технологии резки титановых листов для автоматизированного модуля был проведен сравнительный анализ основных промышленных методов: электроэрозионной, плазменной, механической, лазерной и гидроабразивной. Каждый из них обладает своими преимуществами и ограничениями, однако лишь один способен удовлетворить требования к точности, качеству и технологической универсальности при работе с титаном. Электроэрозионная резка демонстрирует наивысшую точность — до $\pm 0,01$ мм, но при этом отличается крайне низкой скоростью (до 0,2 м/мин) и высокой стоимостью оборудования. Кроме того, она подходит только для токопроводящих материалов, что ограничивает ее применение. Плазменная резка, напротив, быстрая и сравнительно доступная, но страдает от значительного термического влияния и недостаточной точности ($\pm 0,3$ – $0,5$ мм), что делает ее непригодной для обработки высокоточных изделий. Механическая резка, хотя и проста в реализации, не обеспечивает требуемую точность и ограничена по толщине обрабатываемых

мых материалов. Лазерная резка обеспечивает более высокую точность и чистоту обработки, но неэффективна при работе с листами толщиной свыше 15 мм и имеет выраженную термическую зону.

Гидроабразивная резка выгодно отличается от всех перечисленных методов. Она сочетает достаточную для титановых изделий точность ($\pm 0,2$ мм), полное отсутствие термического воздействия, возможность резки листов толщиной до 150 мм, а также приемлемую стоимость оборудования. Этот метод позволяет получать чистую кромку, минимизировать отходы и легко интегрируется в автоматизированные производственные линии [2].

Таким образом, по совокупности технологических и экономических параметров гидроабразивная резка является наилучшим выбором для автоматизации процесса подготовки титановых заготовок, обеспечивая высокое качество продукции и соответствие требованиям ракетно-космической отрасли.

Состав и структура модуля. Модуль автоматизации представляет собой гибкую производственную ячейку, включающую:

- станок гидроабразивной резки APW 1530BA;
- робот-манипулятор KUKA KR 1000 titan;
- стол загрузки титановых листов;
- стол выдачи готовых заготовок;
- программно-аппаратный комплекс управления.



Рис. 1. Состав модуля:

1 — станок гидроабразивной резки; 2 — робот манипулятор; 3 — стол выдачи; 4 — конвейер

На представленной компоновочной схеме (рис. 2) отображена пространственная организация элементов автоматизированного модуля. Модуль включает следующие основные компоненты.

1. Станок гидроабразивной резки — основной элемент, обеспечивающий высокоточную резку титановых листов. Он расположен в центре ячейки для удобства подачи материала и обеспечения максимального охвата зоной действия манипулятора [3, 4].

2. Робот-манипулятор КУКА размещен вблизи станка. Его зона действия охватывает как область загрузки листов, так и область выгрузки готовых заготовок. Манипулятор осуществляет подачу листа на станок и транспортировку обработанных заготовок на стол выдачи.

3. Стол выдачи титановых листов — предназначен для временного хранения исходных заготовок, ожидающих загрузки в станок. Его расположение позволяет манипулятору быстро и точно захватывать листы.

4. Конвейер — установлен вдоль модуля и служит для транспортировки готовых изделий за пределы ячейки или к следующему участку.

5. Дополнительное оснащение — включает элементы пневматических фиксаторов, вакуумных захватов и другие вспомогательные устройства, необходимые для надежной фиксации и безопасной транспортировки заготовок.

6. Стойка управления — размещена на удалении от зоны работы станка и манипулятора. Позволяет оператору запускать процессы, осуществлять контроль, выполнять диагностику и мониторинг в реальном времени.

Размещение всех элементов продумано с учетом эргономики, обеспечения безопасности персонала и минимизации простоев при транспортировке деталей. Компонировка позволяет эффективно использовать рабочее пространство, обеспечивая максимальную производительность и надежность работы модуля.

Система управления модулем. Система управления модулем гидроабразивной резки построена по трехуровневой архитектуре, где каждый уровень отвечает за определенный участок задач — от стратегического планирования до конкретных команд исполнительным механизмам.

Верхний уровень реализован на компьютере оператора и обеспечивает общее управление модулем. С его помощью задаются параметры резки, выбирается программа под нужный диаметр заготовки (620 или 990 мм), контролируется состояние оборудования и визуализируется ход процесса. Также с этого уровня можно запускать цикл, останавливать систему при необходимости, а также сохранять и анализировать логи работы.

Средний уровень обеспечивает координацию взаимодействия между робот-манипулятором и станком. На этом уровне происходит логическая обработка команд: после завершения резки манипулятор получает сигнал на выемку заготовки и ее перемещение. Также здесь контролируются датчики положения, фиксаторы и логика циклов, например не начать подачу листа, пока стол не освободился.

Нижний уровень отвечает за управление физическими устройствами: приводами робота, подачей абразива и воды, запуском и остановкой насоса высокого давления. Здесь используются низкоуровневые сигналы от контроллеров и сенсоров. Также отслеживаются сигналы о перегрузке, аварий-

ной остановке и положении всех подвижных элементов. Если, например, датчик не подтвердил, что лист установлен, система блокирует запуск резки.

Вся структура построена таким образом, чтобы модуль мог работать автономно с минимальным участием оператора. В случае аварии или отклонений система автоматически переходит в безопасное состояние. Благодаря такой архитектуре обеспечивается надежность, гибкость и безопасность работы модуля.

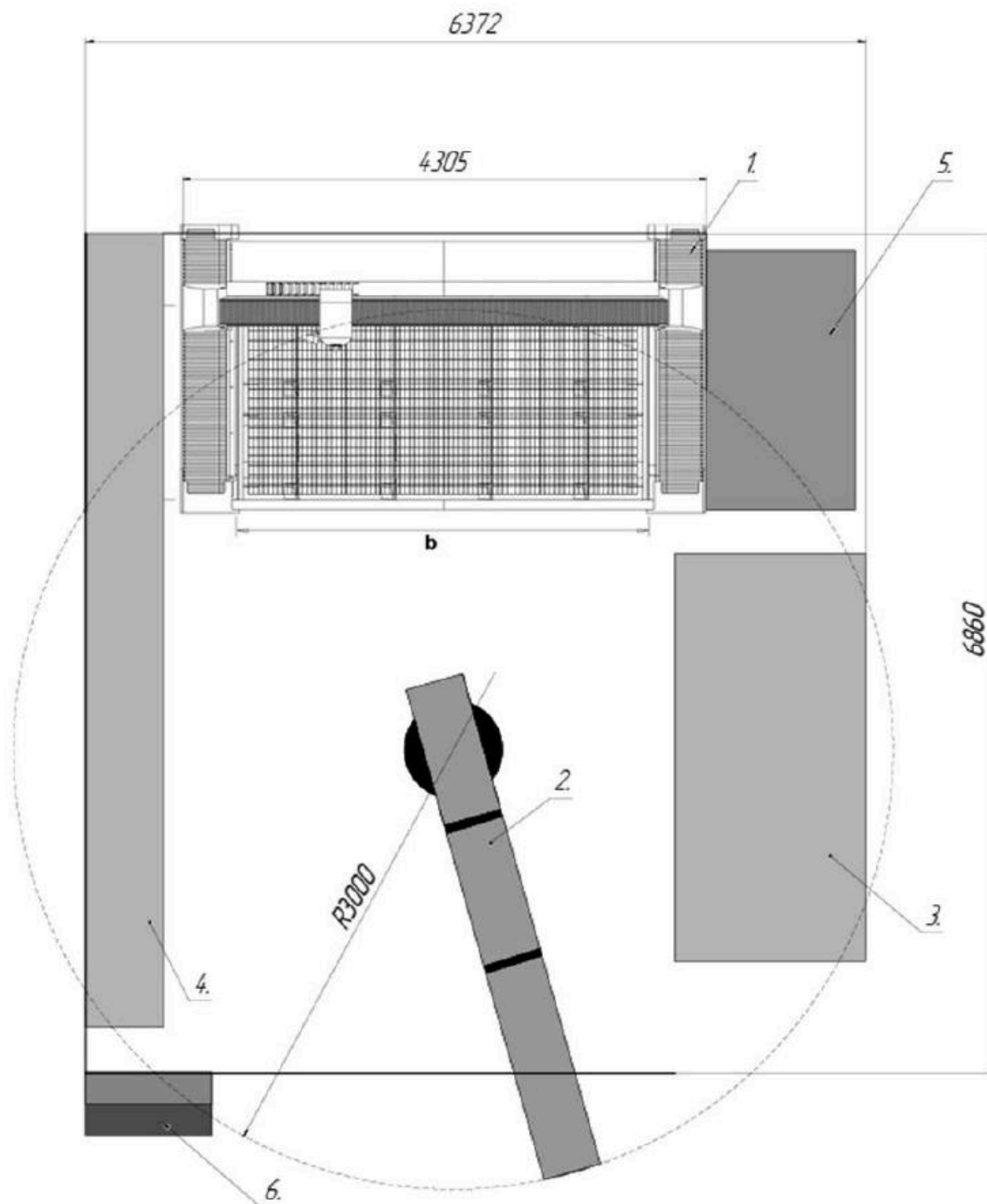


Рис. 2. Компоновочная схема

Расчет процесса работы модуля. Для оценки временных затрат на выполнение операций в модуле гидроабразивной резки составлена диаграмма Ганта. Диаграмма позволяет наглядно представить продолжительность и последовательность операций, а также их зависимость друг от друга.

Процесс состоит из следующих основных этапов.

1. Настройка станка — 10–20 минут.
2. Перенос титана на рабочий стол — приблизительно 30 секунд (~0,5 мин).
3. Резка титана — 46 минут.
4. Перемещение готовых заготовок (3 шт.) на конвейер — 3×18 секунд = ~1 мин.

Суммарное время одного цикла можно определить по формуле

$$T_c = T_{\text{настр}} + T_{\text{перенос}} + T_{\text{резка}} + T_{\text{заготовки}};$$

$$T_c = 15 + 0,5 + 46 + 1 = 62,5 \text{ мин},$$

где $T_{\text{настр}}$ — время настройки станка (в среднем 15 минут); $T_{\text{перенос}}$ — время подачи листа (0,5 минуты); $T_{\text{резки}}$ — время резки листа (46 минут).

Автоматизированный модуль может быть интегрирован в крупные производственные цепочки, особенно в условиях серийного и крупносерийного выпуска продукции для аэрокосмической отрасли. Технология также применима для других сфер, требующих точной обработки титана и сплавов.

Заключение. Проведенное исследование позволило обосновать выбор гидроабразивной резки как наиболее эффективного метода для обработки титановых заготовок. Разработана архитектура модуля, включающего роботизированную систему подачи, станок резки и систему управления. Сформирован алгоритм работы, обеспечивающий полную автоматизацию процесса. Применение модуля в реальных условиях производства позволит повысить качество продукции, снизить издержки и обеспечить соответствие высоким требованиям ракетно-космической отрасли.

Литература

- [1] Черпаков Б.И., Вереина Л.И. *Автоматизация и механизация производства*. Москва, Академия, 2004, 384 с.
- [2] *Полезная информация по гидроабразивной резке*. URL: <https://moyelement.com/news/poleznaya-informatsiya-po-gidroabrazivnoj-rezke> (дата обращения 29.05.2025).
- [3] *Станок гидроабразивной резки портального типа APW 1530BA*. URL: https://mossklad.ru/_PRODUCTPAGE/46545 (дата обращения 29.05.2025).
- [4] *Техника проведения гидроабразивной резки*. URL: <https://w-cut.ru/info/articles/gidrorezka/kak-uvlechit-prodazhi-na-30-s-pomoshchyu-triggernykh-rassylok> (дата обращения 29.05.2025).

Automation of the waterjet cutting module for titanium sheet blanks used in the production of sphere - tanks

Matveev Stepan Sergeevich

Zhargalova Ayagma Dashibalbarovna (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

This paper presents the design and automation of a waterjet cutting module for titanium sheets, intended for the production of sphere-tank blanks used in the aerospace industry. The study includes an analysis of existing cutting technologies, selection of equipment, development of the module's operational algorithm, implementation of the control system, and creation of a layout for a flexible manufacturing cell. All key stages are described — from requirement analysis to the implementation of the integrated module.

Keywords: waterjet cutting, automation, sphere-tank, titanium, control system, robotic manipulator, CNC