



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Компьютерное моделирование и технологическое обеспечение механической обработки тонкостенных титановых полусфер в составе гибридного роботизированного модуля

Аягма Жаргалова^{1, а, *}, Вадим Скиба^{2, б, **}, Глеб Драч^{1, с}, Алексей Морозов^{1, д},
 Кристина Титова^{2, е}, Семен Папко^{2, ф}, Иван Юлусов^{2, г}

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>,  azhargalova@bmstu.ru; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeeba_vadim@mail.ru;
^с  <https://orcid.org/0009-0005-7618-2896>,  drach1254@gmail.com; ^д  <https://orcid.org/0009-0002-1846-7592>,  2809322@gmail.com;
^е  <https://orcid.org/0000-0002-2708-3171>,  krispars@yandex.ru; ^ф  <https://orcid.org/0009-0004-4512-5963>,  papko.duty@yandex.ru;
^г  <https://orcid.org/0009-0006-7566-6722>,  yulusov.2017@stud.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.04:621.81:004.942

История статьи:

Поступила: 27 марта 2026
 Рецензирование: 07 апреля 2026
 Принята к печати: 11 апреля 2026
 Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Шар-баллон
 Титановый сплав ВТ6
 Тонкостенная полусфера
 Гибридное оборудование
 Роботизированный модуль
 Технологический процесс
 Маршрутная карта
 Технологическая оснастка
 Компьютерное моделирование
 СПРУТКАМ

Финансирование

Работа выполнена при поддержке
 Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSUN-2026-0005).

АННОТАЦИЯ

Введение. В аэрокосмической технике для хранения гелия высокого давления применяются тонкостенные титановые шар-баллоны, получаемые сваркой двух прецизионно обработанных полусфер. Геометрическая точность сферических поверхностей и качество подготовки кромок под сварку определяют герметичность и ресурс изделия при рабочих давлениях до 34 МПа и температурах до –196 °С. Пониженная жесткость тонкостенных полусфер делает процесс их механической обработки критически зависимым от схем базирования, усилий закрепления и режимов резания. В контексте концепции Индустрии 4.0 и возрастающей потребности станкоинструментальной промышленности в гибридном станочном оборудовании, интегрирующем механические и поверхностно-термические операции, актуальным становится формирование модульных роботизированных участков, обеспечивающих многофункциональную обработку при сокращенном числе переустановов и повышенной производственной гибкости. Однако существующие методологические подходы к проектированию подобных систем зачастую не учитывают многозадачность, сложность предпроектных исследований и требования модульности конструкции. **Целью настоящей работы** является разработка технологического решения механической обработки тонкостенных титановых полусфер шар-баллонов с использованием компьютерного моделирования, обеспечивающего выполнение требований к точности сферических поверхностей и подготовке кромок под сварку, а также повышение эффективности обработки за счет минимизации риска деформаций, сокращения числа переустановов и снижения времени технологической подготовки при внедрении процесса в состав роботизированного участка модульного типа. **Методы исследования.** Выполнен анализ конструктивно-технологических требований к полусферам и условиям их механической обработки; проведены расчеты режимов резания; осуществлен сравнительный выбор станочного оборудования по системе критериев производственной эффективности; проведена верификация технологических решений в системе автоматизированной подготовки производства СПРУТКАМ с учетом кинематики оборудования. **Результаты и обсуждение.** Сформированы требования к точности и шероховатости обработанных поверхностей: для внутренней сферы $Ra = 0,8$ мкм, для наружной сферы $Ra = 3,2$ мкм. Составлена маршрутная карта обработки, обеспечивающая минимизацию переустановов и снижение риска деформаций тонкостенной оболочки. По совокупности критериев производственной эффективности обоснован выбор вертикального токарно-фрезерного центра DN Solutions PUMA VTS 1214M, обеспечивающего совмещение токарных и фрезерных операций в одном установе, что отвечает принципам интегральной обработки на базе токарного станка с ЧПУ. Составлена и визуализирована схема базирования заготовки с применением специального кольцевого прижимного приспособления. Имитационное моделирование подтвердило реализуемость маршрута, корректность установов и отсутствие коллизий «инструмент – деталь – оснастка», а также показало возможность значительного снижения подготовительно-наладочных затрат при внедрении процесса. Результаты работы вносят вклад в развитие теоретических основ и концептуальных подходов к проектированию гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции.

Для цитирования: Компьютерное моделирование и технологическое обеспечение механической обработки тонкостенных титановых полусфер в составе гибридного роботизированного модуля / А.Д. Жаргалова, В.Ю. Скиба, Г.А. Драч, А.А. Морозов, К.А. Титова, С.С. Папко, И.С. Юлусов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 157–178. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-157-178.

*Адрес для переписки

Жаргалова Аягма Дашибалбаровна, ст. преподаватель
 Московский государственный технический университет
 им. Н.Э. Баумана,
 ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
 105005, г. Москва, Россия
 Тел.: +7 903 177-52-38, e-mail: azhargalova@bmstu.ru

**Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент, в.н.с
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

Современная аэрокосмическая техника предъявляет высокие требования к системам хранения газов высокого давления, эксплуатируемым в условиях экстремальных термобарических нагрузок. Одним из ключевых конструктивных элементов таких систем являются тонкостенные титановые шар-баллоны (рис. 1), предназначенные для хранения гелия при рабочих давлениях до 34 МПа и криогенных температурах до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Подобные изделия формируются путем сварки двух прецизионно обработанных полусфер из титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), обладающего высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и приемлемой свариваемостью [2, 3]. Геометрическая точность сферических поверхностей и качество подготовки кромок под сварку непосредственно определяют герметичность соединения и эксплуатационный ресурс изделия, что делает операцию механической обработки технологически критичной [1, 4].

Тонкостенные полусферы обладают пониженной жесткостью, вследствие чего процесс их механической обработки критически зависит от схем базирования, усилий закрепления и назначаемых режимов резания. При неблагоприятных условиях возникают упругие деформации, погрешности формы и отклонения по подготовке кромок, осложняющие дальнейшую сборку и сварку [5–8]. Вопрос обработки тонкостенных

деталей из титановых сплавов изучается достаточно давно, и к настоящему моменту накоплен значительный массив экспериментальных данных. Ряд авторов [9–12] убедительно показали, что грамотный подбор инструмента и стратегии резания – условие необходимое, но далеко не достаточное. Не менее важна – а в ряде случаев и более – корректная настройка усилий закрепления заготовки: именно она во многом предопределяет уровень вынужденных вибраций и величину геометрических отклонений готовой детали. В работе [13], посвященной фрезерованию тонкостенных элементов из Ti-6Al-4V, акцент сделан на двух взаимосвязанных аспектах – ограничении глубины радиального врезания и управлении тепловым потоком в зоне контакта инструмента с заготовкой. Развивая эту тему, авторы [14] исследовали, каким образом шаг зубьев фрезы и параметры режима резания формируют температурное поле на поверхности тонкостенной заготовки. Обобщающие работы [15, 16] систематизировали современные представления о совместном влиянии вибраций, деформационных механизмов и геометрических погрешностей на итоговое качество обработанной поверхности. Общий вывод этих обзоров: достижение приемлемого результата требует комплексного, а не фрагментарного подхода к управлению процессом.

Особую актуальность задача механообработки тонкостенных изделий приобретает в контексте все возрастающей потребности станкоинструментальной промышленности в разработке гибридного станочного оборудования, обеспечивающего интегральную обработку на базе токарного станка с ЧПУ. Современные требования к точности, производительности, автоматизации и адаптивности оборудования, формируемые в условиях цифровизации производств и концепции Индустрии 4.0, обуславливают необходимость создания методологий, обеспечивающих оптимизацию предпроектных исследований и проектирование конкурентоспособных гибридных металлообрабатывающих систем [17–20]. Как отмечается в работах [21–24], гибридные процессы, объединяющие механическую обработку с поверхностно-термическими операциями (поверхностная закалка, лазерно-ассистированная обработка), позволяют существенно повысить эффективность производственного



Рис. 1. Титановый шар-баллон

Fig. 1. Titanium spherical pressure vessel

цикла, сократить число операций и переустановов, а также улучшить качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Разработка теоретических основ и концептуальных подходов к проектированию гибридного оборудования нового поколения, учитывающего интеграцию механических и поверхностно-термических технологий, представляет собой актуальную научно-практическую проблему [25–27].

В условиях увеличения сложности обрабатываемых деталей, роста спроса на многофункциональное оборудование и сокращения производственных циклов одним из перспективных организационно-технологических решений становится формирование роботизированных участков модульного типа. Современный подход к изготовлению шар-баллонов предполагает организацию именно такого участка, объединяющего технологические операции в последовательность взаимосвязанных модулей с автоматизированной внутрипроизводственной логистикой, контролем качества и информационным сопровождением [28, 29]. В общем виде маршрут изготовления титановых шар-баллонов включает в себя складское обеспечение, получение заготовок резкой, формообразование по-

лусфер, контроль качества, механическую обработку и сварку.

Складской модуль обеспечивает хранение запаса листов из титанового сплава BT6-C и их ритмичную подачу в последующие операции с сохранением прослеживаемости партии. В состав решения входит автоматизированный склад mono-tower, участок разгрузки и средства роботизированной подачи и перемещения (портальный робот AL-LMN и четырехосевой манипулятор), а также система автоматического управления [30]. Выходом модуля является подготовленный к выдаче листовой полуфабрикат, поступающий в модуль резки.

Модуль гидроабразивной резки предназначен для оперативного вырезания заготовок под полусферы требуемых диаметров с минимальным влиянием термических факторов на материал. Ключевым оборудованием служит станок гидроабразивной резки APW 1530BA, а также средства роботизированной загрузки и выгрузки [31]. На вход поступают листы BT6-C; на выходе формируются круглые заготовки, направляемые на формообразование.

Модуль объемной гидравлической вытяжки (рис. 2) выполняет формовку полусфер из кру-

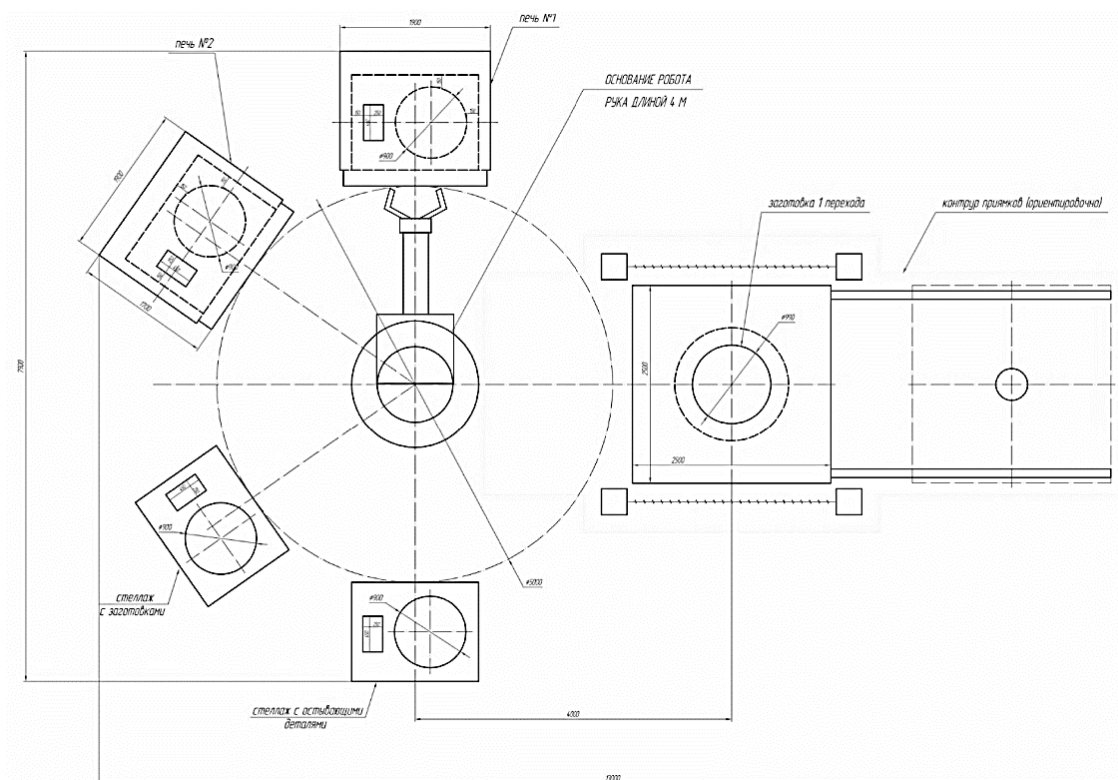


Рис. 2. Компонировка модуля гидравлической вытяжки

Fig. 2. Layout of the hydraulic deep-drawing module

глых заготовок с обеспечением заданной геометрии и припусков под последующие операции. В состав основного оборудования входят вакуумная печь типа Д-9.9.Э-13,5УУ-ИВТ-Ф для нагрева заготовок, гидравлический пресс YD32-500 для штамповки-вытяжки, а также робот-манипулятор для межоперационной транспортировки. В качестве вспомогательного оборудования используются грузовые стеллажи Smart Shelf Hard [32]. На вход модуль принимает вырезанные круги; на выходе формируются заготовки полушфер, которые далее направляются на контроль качества.

Модуль контроля качества (рис. 3, 4) обеспечивает всестороннюю проверку полуфабрикатов и готовых изделий на соответствие техническим требованиям и принятие решений о дальнейшей маршрутизации: «годная», «на доработку», «брак». Основу оборудования контроля составляют дефектоскоп УСД-60ФР и поворотный стол GH-800HT, автоматизацию операций контроля обеспечивают промышленный робот KUKA KR 500 R2830 и коллаборативный робот KUKA LBR iiwa 11 R1300 со сменными захватными устройствами [33]. Обработка результатов поддерживается специализированным программным обеспечением.

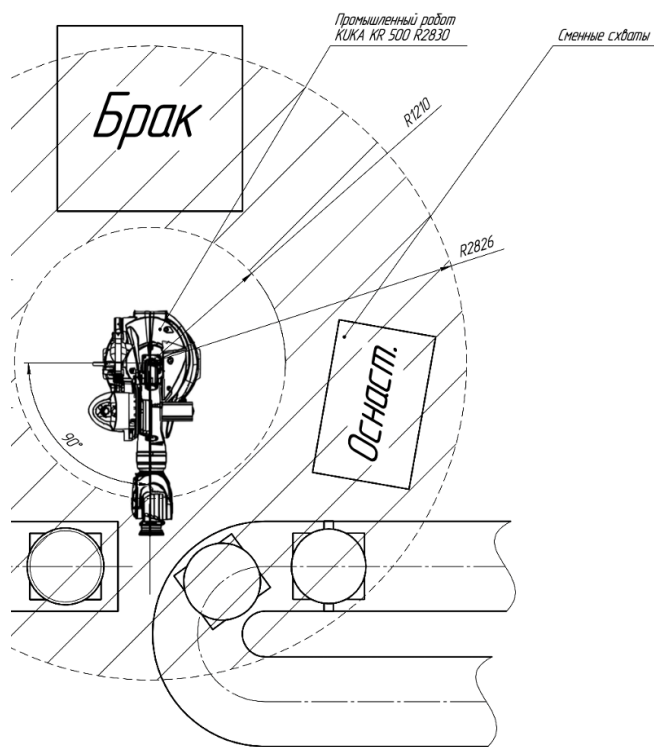


Рис. 3. Модуль контроля качества изделий, часть 1

Fig. 3. Quality inspection module, Part 1

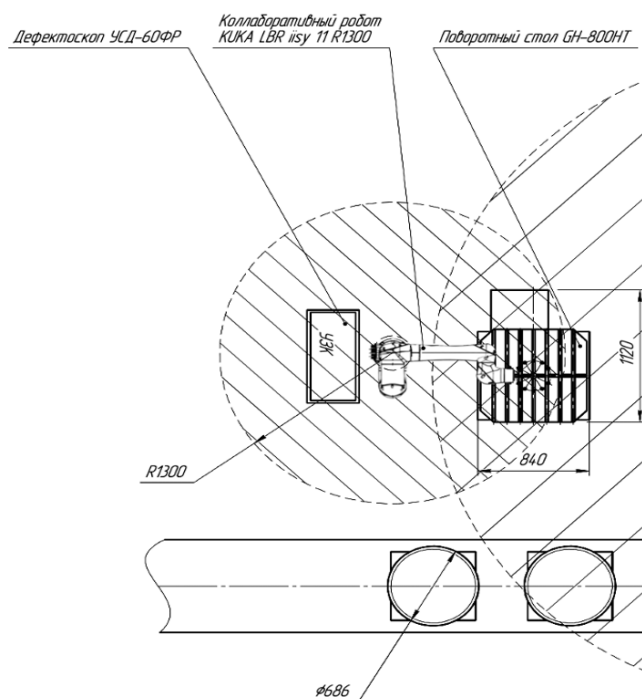


Рис. 4. Модуль контроля качества изделий, часть 2

Fig. 4. Quality inspection module, Part 2

Модуль механической обработки служит связующим звеном между формообразованием полусферы и ее последующей сваркой и обеспечивает достижение требуемой точности сферических поверхностей, качества поверхностного слоя и подготовку кромок под сварку. Именно этот модуль является предметом настоящего исследования.

Модуль сварки выполняет сборочно-сварочные операции, обеспечивающие получение герметичного шар-баллона из двух обработанных полусфер.

Таким образом, модуль механической обработки входит в роботизированный участок как технологически критичный этап, определяющий качество сопряжения полусфер по геометрии и их готовность к сварке. Для тонкостенных заготовок риск деформаций при закреплении и резании, а также сложность пространственных траекторий обработки делают необходимой предварительную верификацию технологии методами компьютерного моделирования [34–36]. Значение цифрового моделирования возрастает в парадигме «цифрового двойника» (Digital Twin), обеспечивающего виртуальное воспроизведение технологического процесса до его физической реализации и интеграцию в цифровую инфраструктуру производства [37–39].

Компьютерное моделирование процесса механической обработки в данном контексте является обязательным элементом технологической подготовки. Оно позволяет верифицировать установки и траектории, выявить потенциальные коллизии «инструмент – деталь – оснастка», а также оценить полноту обработки и технологичность маршрута до запуска в производственную среду, что снижает объем опытных отработок, уменьшает вероятность брака и повышает устойчивость интеграции модуля механической обработки в роботизированный участок изготовления шар-баллонов [40, 41].

Необходимо подчеркнуть, что настоящее исследование выполнено в рамках научного проекта, направленного на разработку теоретических основ и концептуальных подходов к проектированию гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции (проект FSUN-2026-0005). Разрозненное использование различных технологий обработки приводит к увеличению числа операций, затрат времени и снижению точности обработки, поэтому создание комплексного подхода к проектированию гибридных систем, объединяющего современные принципы автоматизации, цифрового моделирования и прогнозирования параметров обработки, является важной задачей для повышения конкурентоспособности отечественной станкоинструментальной отрасли [25, 27, 42].

Цель настоящей работы: разработка технологического решения механической обработки тонкостенных титановых полусфер шар-баллонов с использованием компьютерного моделирования, обеспечивающего выполнение требований к точности сферических поверхностей и подготовке кромок под сварку, а также повышение эффективности обработки за счет сокращения риска деформаций, уменьшения числа переустановов и снижения времени технологической подготовки при внедрении процесса в состав роботизированного участка модульного типа.

Для достижения поставленной цели в процессе исследования требовалось решить следующие **задачи**:

- провести анализ конструктивно-технологических требований к полусферам шар-баллонов и выделить параметры, критичные для механической обработки;

- разработать маршрутную карту технологического процесса, провести сравнительный анализ различных вариантов станочного оборудования для механической обработки полусфер и обосновать выбор предпочтительной компоновки с позиций интегральной обработки;

- составить схему базирования заготовки на выбранном оборудовании;

- выполнить компьютерное моделирование механообработки в системе СПРУТКАМ и провести верификацию технологических решений.

Методика исследований

Для достижения поставленных целей применен комплекс методов, включающий в себя анализ требований к геометрии, шероховатости, герметичности и условиям обработки шар-баллонов из сплава ВТ6; расчет режимов резания; формирование критериев выбора оборудования и сопоставление альтернативных станков по ключевым технологическим показателям; моделирование технологического процесса в системе автоматизированной подготовки производства СПРУТКАМ.

В исследовании рассматривались два типоразмера шар-баллонов: объемом 25 и 130 л. Для каждого типоразмера были заданы основные геометрические параметры, определяющие требования к механической обработке и выбору оборудования. Для шар-баллона объемом 130 л: внешний диаметр полусферы 649 мм, толщина сферической оболочки 8 мм, диаметр зоны приварки штуцера 200 мм. Для шар-баллона объемом 25 л: внешний диаметр полусферы 377,5 мм, толщина сферической оболочки 5 мм, диаметр зоны приварки штуцера 150 мм. Таким образом, полусферы относятся к классу тонкостенных оболочковых деталей, для которых отношение толщины стенки к диаметру составляет 1,2...1,3 %, что обуславливает их повышенную податливость при закреплении и обработке.

При формировании требований к готовым полусферам и разработке рабочих чертежей использована следующая нормативная документация: требования к применению и обозначению титановых сплавов по ГОСТ 19807–91 [2], требования к параметрам шероховатости по ГОСТ 2789–73 [43], правила назначения допусков размеров обработанных деталей по

ГОСТ 30893.1–2002, а также общие требования ЕСКД к оформлению конструкторской документации.

При разработке маршрутной карты механической обработки в качестве базового объекта была выбрана большая полусфера (130 л), поскольку ее обработка представляет собой более сложную технологическую задачу: при большем диаметре и толщине оболочки требуется более жесткая фиксация заготовки и более щадящие режимы резания с целью предотвращения деформаций.

Расчет режимов резания выполнялся с учетом специфики обработки титанового сплава ВТ6, характеризующегося высокой прочностью, низкой теплопроводностью и склонностью к наклепу поверхностного слоя, что требует ограничения скоростей резания и обеспечения эффективного теплоотвода [3, 44, 45].

Для токарной обработки расчет частоты вращения шпинделя выполнялся по зависимости

$$n=1000 \frac{V}{\pi D},$$

где n – частота вращения, об/мин; V – скорость резания, м/мин; D – диаметр обработки, мм [46–48].

При фрезеровании титанового сплава ВТ6 необходимо ограничивать толщину срезаемого слоя и тепловыделение: предпочтительны небольшие радиальные врезания (a_e) и контролируемая осевая глубина (a_p) при достаточной подаче на зуб для исключения режима трения, приводящего к ускоренному износу инструмента и ухудшению качества поверхности [14, 49]. Частота вращения шпинделя при фрезеровании определялась по формуле

$$n=1000 \frac{V}{\pi D_{\text{фрез}}},$$

где $D_{\text{фрез}}$ – диаметр фрезы, мм [46, 50]. Во всех операциях обеспечивалась обильная подача СОЖ – для сплава ВТ6 это напрямую связано как с ресурсом инструмента, так и со стабильностью качества обработанной поверхности [44, 45].

При оценке трудоемкости маршрута использовались зависимости для расчета основного времени по отдельным переходам. Основное время для точения и сверления:

$$t_{\text{осн}} = \frac{L}{Sn} i,$$

где L – длина рабочего хода, мм; S – подача, мм/об; n – частота вращения, об/мин; i – число проходов.

Основное время для фрезерования:

$$t_{\text{осн}} = \frac{L_{\text{тр}}}{F} i,$$

где $L_{\text{тр}}$ – длина траектории, мм; F – минутная подача, мм/мин; i – число проходов.

Длина дуги при обработке сферической поверхности определялась по формуле

$$L_{\text{сф}} = R\varphi,$$

где R – радиус полусферы, мм; φ – угол обработки, рад.

Выбор оборудования для модуля механической обработки выполнялся путем сравнения трех альтернативных станков: PUMA VTS 1214M – вертикальный токарно-фрезерный центр [51]; DN Solutions SMX 5100 – горизонтальный токарно-фрезерный центр с осью Y ; EMAG VLC 1200 – вертикальная ячейка pick-up [52]. Выбор осуществлялся по системе критериев производственной эффективности, отражающих влияние станка на качество тонкостенной детали, устойчивость процесса и суммарную трудоемкость. При сравнении вариантов использовались следующие критерии.

Габаритный запас под деталь и технологическую оснастку. Критерий оценивает достаточность рабочего пространства (диаметр обработки, высота, доступ инструмента) с учетом крупногабаритной полусферы и применяемого приспособления. Критерий напрямую влияет на технологическую реализуемость траекторий, риск ограничений по кинематике и сложность наладки.

Устойчивость процесса при обработке тонкостенной оболочки. Критерий характеризует склонность технологической системы «станок – оснастка – деталь – инструмент» к вибрациям и деформациям. Применительно к тонкостенной полусфере этот параметр приобретает особое значение: именно он задает границы стабильности при точении сферических поверхностей и, по существу, определяет вероятность появления отклонений формы или размера, вызванных податливостью самой детали [5, 10, 16].

Отдельного внимания заслуживает *организация стружкоудаления и подвода смазочно-охлаждающей жидкости*, в особенности при работе с внутренними поверхностями титановых заготовок. Здесь оценивается, насколько эффективно удастся отводить стружку и рассеивать теплоту непосредственно из зоны резания. Практическую значимость этого критерия трудно переоценить: от него напрямую зависят ресурс инструмента, риск локального перегрева и, как следствие, вероятность появления поверхностных дефектов, что для сплава ВТ6 с его низкой теплопроводностью особенно критично [44, 45].

Еще один принципиальный критерий – *возможность совмещения точения с локальным фрезерованием или сверлением* в рамках одного станова. По сути, речь идет о сокращении числа переустановок заготовки и соответственно об уменьшении накапливающихся погрешностей базирования. Этот подход непосредственно вписывается в концепцию интегральной обработки на базе токарного станка с ЧПУ – направление, активно развивающееся в контексте проектирования гибридного станочного оборудования [21, 25, 42].

Вспомогательное время: установка, базирование, переналадка, доступ и контроль. Критерий характеризует трудоемкость подготовки и выполнения установов. Он напрямую влияет на производительность и стабильность качества при серийном выполнении маршрута.

По совокупности критериев предпочтение отдается оборудованию, которое обеспечивает устойчивое точение сферических поверхностей, благоприятные условия стружкоудаления при обработке внутренних зон, а также минимизацию числа переустановов за счет совмещения операций, что отвечает принципам проектирования гибридных металлообрабатывающих систем.

В качестве программной среды автоматизированной подготовки производства была выбрана система СПРУТКАМ, поскольку она обеспечивает разработку управляющих программ и компьютерную проверку токарно-фрезерной обработки в единой среде, что особенно важно при обработке тонкостенных титановых полусфер на токарно-фрезерном центре [53]. СПРУТКАМ позволяет задавать установы и базирование, формировать траектории с подбором инстру-

мента и стратегий обработки, а также выполнять имитационное моделирование с учетом кинематики оборудования. Это дает возможность заранее выявлять и устранять потенциально опасные зоны обработки, что сокращает объем отработки на станке, снижает вероятность брака и в итоге повышает эффективность технологической подготовки. Кроме того, система поддерживает постпроцессирование и адаптацию под конкретную конфигурацию оборудования, обеспечивая полный цикл подготовки от 3D-модели до NC-кода.

Автоматизированная подготовка механической обработки тонкостенной полусферы из титанового сплава ВТ6 в системе СПРУТКАМ проводилась с целью проверки технологической реализуемости маршрута (доступности поверхностей, корректности подводов и отводов, полноты снятия припуска); формирования траекторий обработки по переходам; получения исходных данных для последующего постпроцессирования и подготовки управляющих программ [53]. Такой подход соответствует современным представлениям о виртуальных процессных системах, позволяющих моделировать взаимодействие инструмента, детали и оснастки до физической реализации технологического процесса [34, 37, 54].

Результаты и их обсуждение

Требования к точности и шероховатости обработанных поверхностей. Исходя из условий эксплуатации шар-баллонов (рабочее давление до 34 МПа, криогенные температуры) и конструктивных особенностей полусфер были сформулированы требования к поверхностям готовых деталей, обусловленные необходимостью обеспечения герметичности сварного соединения и прочности оболочки в эксплуатации.

Для полусферы шар-баллона объемом 25 л (рис. 5) установлены следующие требования. Требования к точности основных сферических поверхностей: внутренний радиус $R = 183,75 \pm 0,2$ мм; наружный радиус $R = 188,75 \pm 0,3$ мм. Требования к точности функциональных элементов: отверстие для приварки штупера $\varnothing 150 \pm 0,2$ мм; толщина стенок $5 \pm 0,25$ мм. Сварная кромка: допуск перпендикулярности поверхности относительно базовой поверхности B со-

Малая полусфера после механической обработки

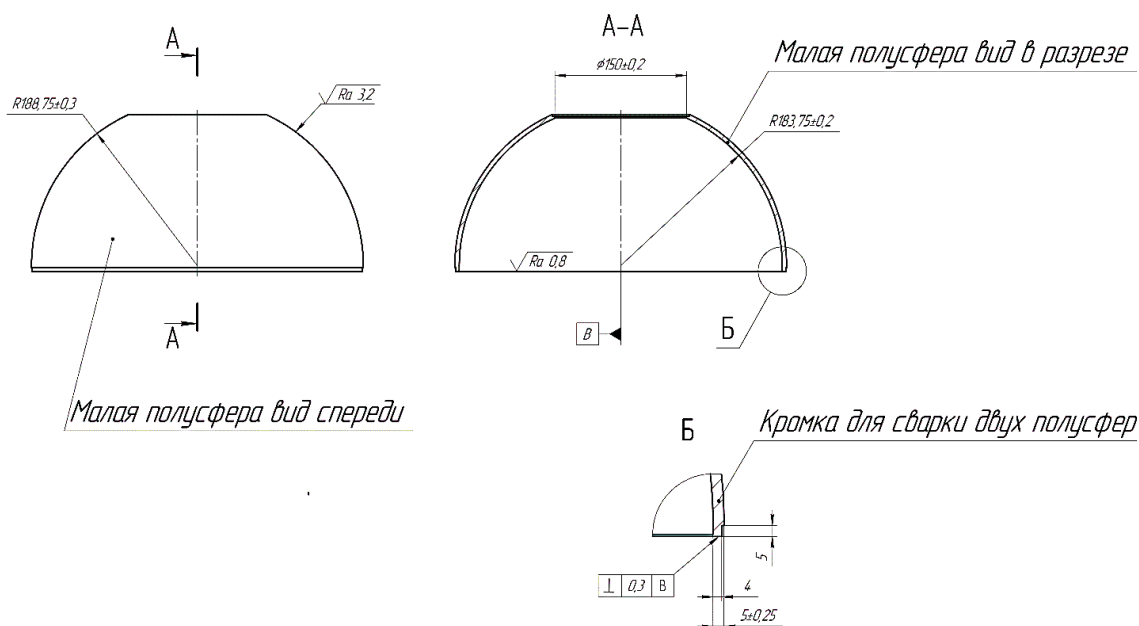


Рис. 5. Малая полусфера, результат механической обработки

Fig. 5. Small hemisphere: result of machining

ставляет 0,3 мм. Требования к шероховатости обработанных поверхностей: для внутренней сферической поверхности $Ra = 0,8$ мкм; для наружной сферической поверхности $Ra = 3,2$ мкм.

Для полусферы шар-баллона объемом 130 л (рис. 6) установлены следующие требования. Требования к точности основных сферических поверхностей: внутренний радиус $R = 316,5 \pm 0,2$ мм; наружный радиус $R = 324,5 \pm 0,3$ мм. Требования к точности функциональных элементов: отверстие для приварки штуцера $\varnothing 200 \pm 0,2$ мм; толщина стенок $8 \pm 0,25$ мм. Сварная кромка: допуск перпендикулярности поверхности относительно базовой поверхности В составляет 0,3 мм. Требования к шероховатости обработанных поверхностей: для внутренней сферической поверхности $Ra = 0,8$ мкм; для наружной сферической поверхности $Ra = 3,2$ мкм.

Следует отметить, что повышенные требования к шероховатости внутренней поверхности ($Ra = 0,8$ мкм против $Ra = 3,2$ мкм для наружной) обусловлены необходимостью обеспечения стабильных условий течения рабочего газа и минимизации концентраторов напряжений на внутренней поверхности оболочки, находящейся под воздействием высокого давления. Назначенные допуски на толщину стенки ($\pm 0,25$ мм)

обеспечивают равномерность распределения напряжений в тонкой оболочке при нагружении, что критично для предотвращения локализации деформаций и разрушения [1, 5].

Маршрутная карта обработки и расчет режимов резания. Согласно выполненным расчетам режимов резания и параметров обработки по переходам был сформирован комплект исходных данных для маршрутной карты механической обработки большой полусферы шар-баллона объемом 130 л из сплава ВТ6. В результате расчетов для каждого перехода получены и согласованы следующие параметры: для операций точения и растачивания – глубина резания t , подача S (мм/об), скорость резания V (м/мин) и рассчитанная частота вращения шпинделя n (об/мин) для черновых и чистовых проходов; для фрезерования – радиальная и осевая глубины резания (a_e, a_p), скорость резания V , подача на зуб f_z и минутная подача F (мм/мин); для сверления и центрирования – подача, скорость резания и частота вращения, достаточные для стабильного формирования функциональных элементов без перегрева и задиров.

Назначение режимов осуществлялось с учетом известных рекомендаций по обработке титановых сплавов, систематизированных в рабо-

Большая полусфера после механической обработки

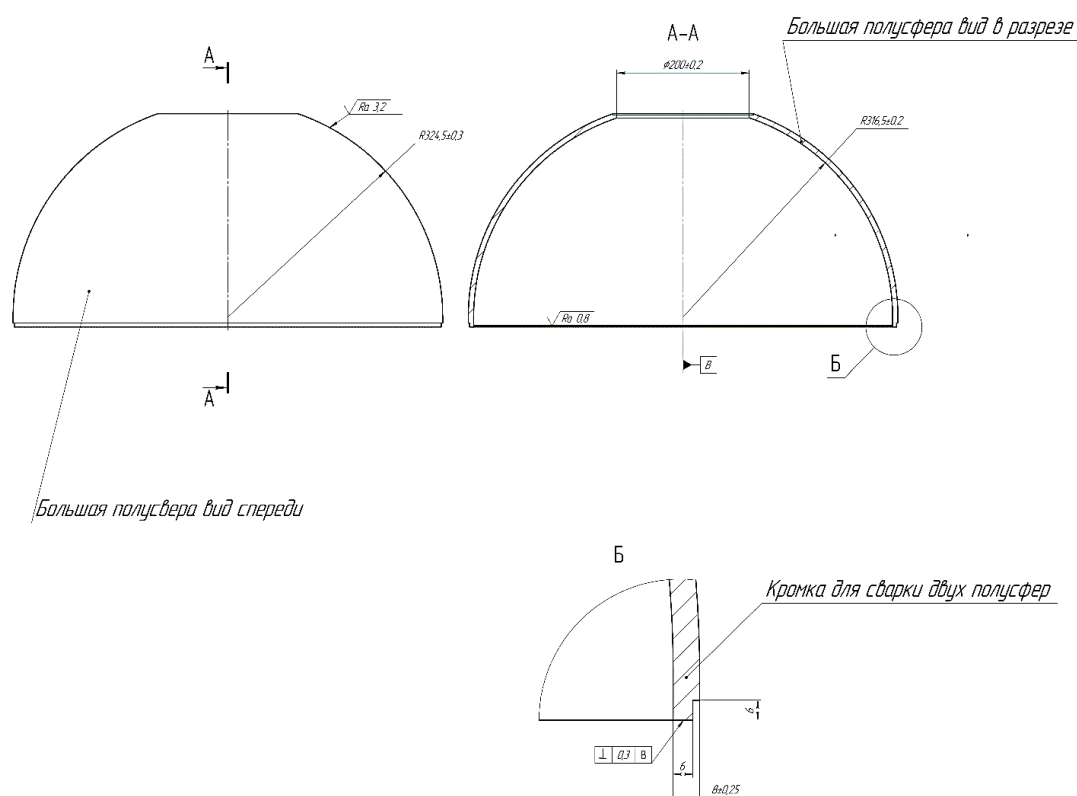


Рис. 6. Большая полусфера, результат механической обработки

Fig. 6. Large hemisphere: result of machining

тах [44, 45, 55]: ограничение скорости резания при черновом точении уровнем 20...30 м/мин, при чистовом – до 70...80 м/мин; обеспечение подачи, исключающей образование «нулевой» стружки и снижающей вероятность наростообразования; обильное охлаждение СОЖ для компенсации низкой теплопроводности сплава.

Полученные значения режимов резания использованы как базовые входные параметры для автоматизированной подготовки управляющих программ, формирования траекторий и последующей проверки установов в среде моделирования СПРУТКАМ.

В качестве примера полученных данных рассмотрим обработку внутренней сферы – одного из наиболее трудоемких и технологически ответственных фрагментов маршрута. В рамках **Установка 1** выполняется черновая и чистовая обработка внутренней сферической поверхности (операция 020).

Переход 3 – черновая обработка внутренней сферы: $t = 2,0$ мм; $S = 0,30$ мм/об; $V = 25$ м/мин;

$n = 13$ об/мин; длина рабочего хода $L = 414,2$ мм; число проходов $i = 1$.

Основное время данного перехода составило

$$t_{\text{осн}} = 414,2 \cdot 10,30 \cdot 13 = 106,2 \text{ мин.}$$

Переход 4 представляет собой чистовую обработку внутренней сферы при следующих параметрах: $t = 1,0$ мм; $S = 0,15$ мм/об; $V = 80$ м/мин; $n = 41$ об/мин; длина рабочего хода $L = 414,2$ мм; число проходов $i = 1$. Расчет дает

$$t_{\text{осн}} = 414,2 \cdot 10,15 \cdot 41 = 67,35 \text{ мин.}$$

В сумме обработка внутренней сферы в рамках **Установка 1** занимает 173,55 мин. Это, пожалуй, один из наиболее трудоемких участков всего маршрута. Столь значительная продолжительность объясняется сочетанием двух факторов: большим диаметром сферической поверхности ($\varnothing 649$ мм) и ограничениями по скорости резания, характерными для сплава ВТ6. Закономерно, что такая длительность цикла предъявляет повышенные требования к надежности закрепления, стабильности процесса и, что не-

маловажно, к организации стружкоудаления. Полученные значения трудоемкости лишний раз подтверждают: при таких объемах снятия материала целесообразно использовать оборудование, позволяющее совмещать операции в минимальном числе установов.

Стоит отдельно пояснить принятую последовательность переходов. Решение начинать с внутренней сферы (*Установ 1*) и лишь затем переходить к наружной поверхности и кромкам (*Установ 2*) продиктовано стремлением минимизировать технологические деформации. Логика здесь следующая: пока обрабатывается внутренняя полость, заготовка опирается наружной стороной на технологическую оснастку, обеспечивая тем самым максимальную жесткость системы на наиболее ответственном этапе – при съеме основного припуска.

Выбор станочного оборудования. По результатам сравнения паспортных характеристик и оценки по критериям эффективности для механической обработки полусфер выбран вертикальный токарно-фрезерный центр DN Solutions PUMA VTS 1214M (рис. 7). Выбор обоснован тем, что вертикальная компоновка обеспечивает уверенный габаритный запас под деталь класса $\varnothing \sim 650$ мм и оснастку, улучшает условия стружкоудаления и подвода СОЖ при внутренней обработке (стружка удаляется из зоны резания под действием силы тяжести, что снижает риск повторного контакта с обработанной поверхностью и инструментом), а также позволяет объединять токарные и фрезерные переходы в минимальное число установов, что сокращает вспомогательное время и повышает устойчивость процесса для тонкостенной оболочки.

Применение вертикального токарно-фрезерного центра, обеспечивающего совмещение различных видов обработки на единой станочной базе, отвечает концепции интегральной обработки, развиваемой в рамках научного проекта по созданию гибридного станочного оборудования [25, 27, 42]. Многофункциональность выбранного станка позволяет рассматривать его как базовую платформу для последующей интеграции дополнительных обрабатывающих технологий, включая поверхностно-термические операции, что является перспективным направлением развития гибридных металлообрабатывающих систем [21, 22, 24].



Рис. 7. Станок PUMA VTS 1214M

Fig. 7. PUMA VTS 1214M machine tool

В сравнении с альтернативными вариантами горизонтальный токарно-фрезерный центр DN Solutions SMX 5100, обладающий расширенной кинематикой (ось Y), обеспечивает более широкие технологические возможности по фрезерной обработке. Однако его горизонтальная компоновка менее благоприятна для стружкоудаления при обработке внутренних полостей крупногабаритных тонкостенных оболочек. Вертикальная ячейка EMAG VLC 1200 оптимизирована для серийного производства с автоматической загрузкой, но возможности совмещения токарных и фрезерных переходов у нее ограничены, что приводит к увеличению числа переустановов.

Схема базирования заготовки. Для механической обработки тонкостенной полусферы из титанового сплава BT6 требуется закрепление, обеспечивающее устойчивость детали без ее деформации и без повреждения обработанных поверхностей. Специфика тонкостенной оболочки заключается в том, что даже незначительные сосредоточенные усилия закрепления способны вызвать локальные деформации, приводящие к погрешностям формы, превышающим допустимые значения [5, 8, 56]. В качестве решения принято специальное кольцевое прижимное

приспособление, устанавливаемое на планшайбу станка и работающее по схеме осевого стягивания, что обеспечивает распределенное приложение усилия закрепления по периметру заготовки. Для подобранного оборудования составлена схема базирования заготовки (рис. 8).

Установка выполняется на станке PUMA VTS 1214M. Специальное приспособление закрепляется в Т-пазах планшайбы, при этом ось приспособления совмещается с осью шпинделя, а технологический хвост заготовки устанавливается в расточные кулачки. Такая схема базирования обеспечивает реализацию принципа совмещения технологической и измерительной баз, что минимизирует погрешность установки и повышает точность обработки [57].

Разработанная схема базирования учитывает необходимость обеспечения доступа инструмента как к внутренней, так и к наружной сферическим поверхностям, а также к зоне формирования сварной кромки. Применение осевого

стягивания вместо радиального зажима позволяет исключить неконтролируемые деформации тонкой оболочки в радиальном направлении, что подтверждается результатами исследований по оптимизации условий закрепления тонкостенных деталей [8, 9, 56].

Нормирование трудоемкости. После выбора схемы базирования и закрепления выполнено нормирование трудоемкости операций для изготовления одной детали шар-баллона объемом 130 л. Согласно результатам расчета основного времени по переходам, суммарное основное время обработки составило $t_{\text{осн}\Sigma} = 437,80$ мин, т. е. приблизительно 7,3 часа.

Вспомогательное время и время переустановов приняты следующими: установка и закрепление на первом установе $t_{\text{уст1}} = 12$ мин; переустановка между первым и вторым установами $t_{\text{пер}} = 20$ мин; снятие детали после второго установа $t_{\text{сн}} = 8$ мин; операционный контроль по завершении второго установа $t_{\text{конт}} = 10$ мин. Суммарное вспомогательное время составляет $t_{\text{всп}} = 50$ мин, а общее время изготовления одной детали – 8 ч 13 мин.

Анализ структуры трудоемкости показывает, что доля вспомогательного времени составляет около 10 % от общего цикла изготовления, что свидетельствует об эффективности принятого решения по совмещению операций и минимизации числа переустановов до двух. При альтернативных вариантах оборудования, не обеспечивающих совмещения токарных и фрезерных переходов, число установов возрастает до трех-четырех, что увеличивает вспомогательное время на 40...60 % и повышает накопленную погрешность базирования. Этот результат подтверждает целесообразность применения принципов интегральной обработки на базе многофункционального станка с ЧПУ.

Компьютерное моделирование в системе СПРУТКАМ. Компьютерное моделирование механической обработки тонкостенной полусферы было выполнено в системе СПРУТКАМ с целью верификации разработанного технологического процесса до его реализации в производственных условиях. Среда моделирования обеспечивала воспроизведение кинематической схемы станка PUMA VTS 1214M, геометрии заготовки и оснастки, а также полного набора режущего инструмента, используемого в маршруте.

Схема базирования детали
на станке PUMA VTS1214 M

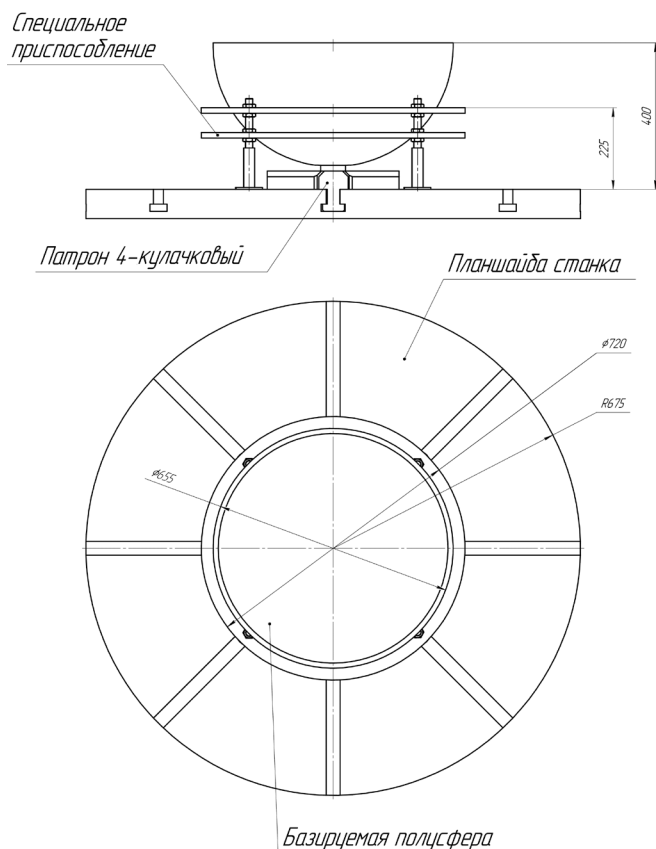


Рис. 8. Схема базирования заготовки

Fig. 8. Workpiece locating (datum) chart

В ходе моделирования была проверена корректность выбранных режимов и траекторий обработки по всем переходам обоих установов. Имитационное моделирование позволило подтвердить реализуемость маршрута на выбранном оборудовании; верифицировать отсутствие коллизий «инструмент – деталь – оснастка» на всех этапах обработки; оценить полноту снятия припуска и корректность подводов/отводов инструмента; визуализировать процесс обработки для каждого установа и перехода.

В качестве примера успешного моделирования рассмотрим переход 10 – фрезерование сферической фрезой $\varnothing 16$ (рис. 9). Переход 10 выполнен как 3D-обработка участка наружной поверхности полусферы, где до этого располагалась технологическая конструкция (технологический хвост, используемый для фиксации заготовки в первом установе). Инструмент – сферическая концевая фреза $\varnothing 16$ мм. Моделирование подтвердило корректность траектории инструмента, отсутствие зон непрореза и столкновений с элементами оснастки. Применение сферической фрезы обеспечивает плавное копирование криволинейного профиля наружной сферы с соблюдением требований по шероховатости $Ra = 3,2$ мкм.

Помимо проверки геометрии, виртуальное моделирование в среде СПРУТКАМ дало воз-

можность оценить кинематику перемещений рабочих органов станка при выполнении пространственных траекторий сложной формы. Для крупногабаритных деталей с криволинейным профилем такая верификация особенно востребована. В ходе моделирования не было выявлено ни столкновений элементов оборудования, ни случаев превышения допустимого рабочего хода, что подтвердило корректность ранее принятых решений по выбору станка и оснастки.

В целом результаты виртуального моделирования свидетельствуют о технологической реализуемости разработанного маршрута. Они могут служить исходной базой для последующего постпроцессирования и формирования управляющих программ. Важно подчеркнуть и другое: построенные виртуальные модели процесса представляют собой, по существу, фрагмент цифрового двойника модуля механической обработки. В перспективе этот фрагмент может быть встроен в единое цифровое пространство роботизированного участка изготовления шарбаллонов [37–39].

Представленные результаты, рассмотренные в контексте проектирования гибридного оборудования, позволяют говорить о работоспособности предложенного подхода к технологической подготовке обработки тонкостенных титановых полусфер. Подход этот охватывает несколько

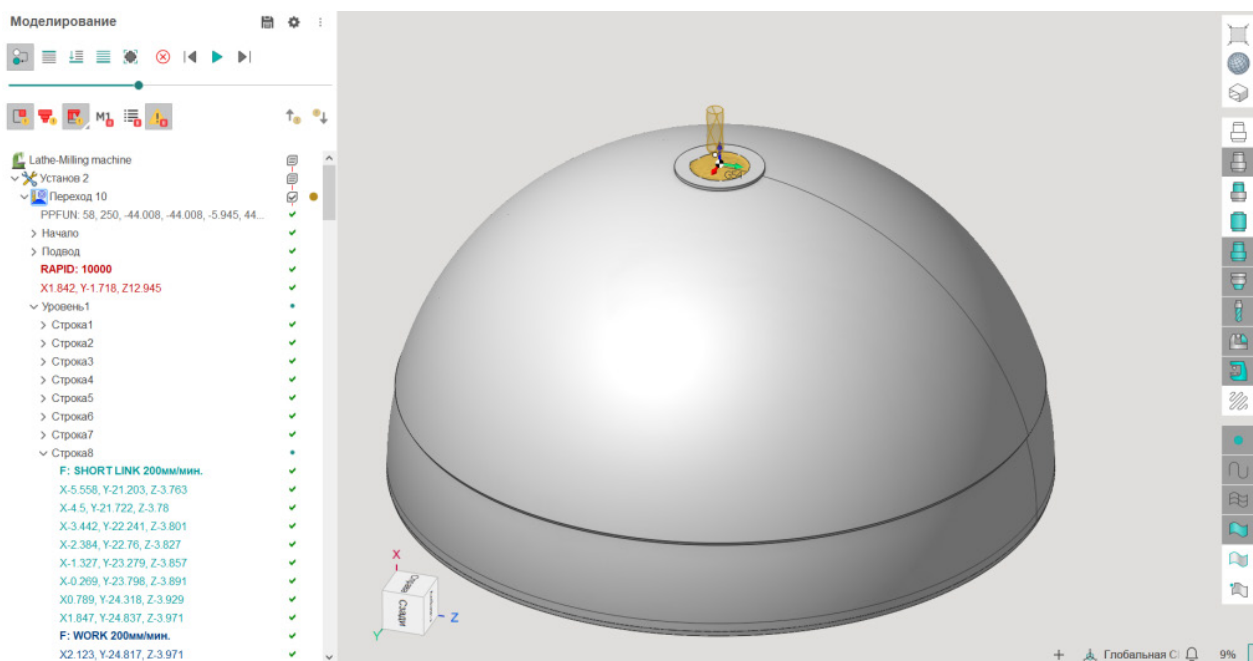


Рис. 9. Моделирование перехода 10

Fig. 9. Simulation of Pass 10

взаимосвязанных этапов: системный анализ технических требований, обоснованный выбор оборудования, разработку схемы базирования и виртуальную верификацию маршрута – и именно их взаимная увязка обеспечивает целостность решения. Такой подход развивает концепцию интегральной обработки на базе токарного станка с ЧПУ и вносит вклад в формирование теоретических основ проектирования гибридного станочного оборудования.

С позиции развития гибридных обрабатывающих систем полученные результаты имеют следующее значение. Во-первых, продемонстрирована принципиальная возможность реализации полного цикла механической обработки сложнопрофильных тонкостенных деталей на едином многофункциональном станке с минимизацией числа переустановов, что является ключевым принципом гибридного оборудования [21, 25]. Во-вторых, разработанная методика компьютерного моделирования технологического процесса может быть расширена для включения операций поверхностно-термической обработки (индукционная закалка, лазерное упрочнение), что представляет собой следующий этап развития гибридного модуля [22, 24, 27]. В-третьих, предложенная система критериев выбора оборудования применима не только для рассматриваемого частного случая, но и для широкого класса задач проектирования модулей механической обработки в составе гибридных производственных систем.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция модуля поверхностно-термической обработки в состав технологического маршрута, что позволит реализовать на единой станочной базе как механическую обработку сферических поверхностей, так и упрочнение функциональных зон (кромки под сварку, зоны приварки штуцера), повысив тем самым эксплуатационные характеристики изделий и сократив общий производственный цикл.

Заключение

1. Выполнен системный анализ конструктивно-технологических требований к изготовлению тонкостенных титановых полусфер шарбаллонов из сплава ВТ6, включая параметры

геометрической точности, шероховатости поверхностей и герметичности сварного соединения. Установлены критичные для механической обработки параметры: шероховатость внутренней сферы $Ra = 0,8$ мкм, шероховатость наружной сферы $Ra = 3,2$ мкм, допуск на толщину стенки $\pm 0,25$ мм, допуск перпендикулярности сварной кромки 0,3 мм. Сформулированные требования обеспечивают выполнение условий герметичности при эксплуатационных давлениях до 34 МПа и криогенных температурах до -196 °С.

2. Для всех технологических переходов маршрута обработки большой полусферы ($\varnothing 649$ мм, объем 130 л) выполнены расчеты режимов резания и нормирование трудоемкости операций с учетом специфики обработки сплава ВТ6 (ограничение скоростей резания, обильное охлаждение СОЖ). Суммарное основное время обработки составило 437,80 мин, общее время изготовления одной детали – 8 ч 13 мин при двух установках, что подтверждает эффективность принятого решения по совмещению операций.

3. Выполнен сравнительный выбор станочного оборудования по системе критериев производственной эффективности. Обоснована предпочтительность вертикального токарно-фрезерного центра DN Solutions PUMA VTS 1214M, обеспечивающего совмещение токарных и фрезерных переходов в минимальном числе установов, благоприятные условия стружкоудаления при обработке внутренних полостей и достаточный габаритный запас под деталь и оснастку. Выбранная компоновка отвечает принципам интегральной обработки на базе токарного станка с ЧПУ и концепции гибридного станочного оборудования.

4. Для обеспечения минимальных деформаций тонкостенной заготовки разработана и визуализирована схема базирования и закрепления с применением специального кольцевого прижимного приспособления, работающего по принципу осевого стягивания. Схема обеспечивает распределенное приложение усилия закрепления по периметру заготовки, совмещение технологической и измерительной баз, а также доступ инструмента к внутренней и наружной сферическим поверхностям.

5. Проведено имитационное моделирование технологического процесса в системе СПРУТ-КАМ: подготовлены установы, сформированы

траектории обработки и выполнена симуляционная проверка технологических решений с учетом кинематики оборудования. Моделирование подтвердило реализуемость маршрута, отсутствие коллизий «инструмент – деталь – оснастка» и корректность установов, а также продемонстрировало возможность значительного сокращения времени технологической подготовки при внедрении процесса. Полученные виртуальные модели технологического процесса могут рассматриваться как элемент цифрового двойника модуля механической обработки в составе роботизированного участка изготовления шар-баллонов.

6. Результаты работы вносят вклад в развитие теоретических основ и концептуальных подходов к проектированию гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции. Перспективным направлением является интеграция поверхностно-термической обработки в состав технологического маршрута на единой станочной базе, что позволит повысить эксплуатационные характеристики изделий и сократить общий производственный цикл.

Список литературы

1. Создание передовой технологии и оборудования для изготовления титановых шар-баллонов / И.В. Ломакин, А.Ю. Рязанцев, С.С. Юхневич, А.А. Широкожухова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 12. – С. 37–43. – DOI: 10.18698/0536-1044-2021-12-37-43. – EDN: KTLCCCT.
2. ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 6 с.
3. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49 (7–8). – P. 561–568. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.
4. Predictive modeling of deformation induced by residual stress for thin-walled parts in double-sided alternating precision turning / S. Qi, S. Yan, J. Xu, Y. Sun // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. – Vol. 146. – P. 19–29. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.04.085.
5. A review of the deformation mechanism and control of low stiffness thin-walled parts / H. Sun, J. Zhao, Z. Zheng, Y. Jiang, X. Jin, S. Deng, Y. Tang, X. Zhang // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2025. – Vol. 60. – P. 322–355. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.05.007.
6. Research progress in machining technology of aerospace thin-walled components / Z. Li, Z. Zeng, Y. Yang, Z. Ouyang, P. Ding, J. Sun, S. Zhu // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 119. – P. 463–482. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.03.111.
7. Wang L., Zhao H. A short review on machining deformation control of aero-engine thin-walled casings // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 121 (5). – P. 2971–2985. – DOI: 10.1007/s00170-022-09546-w.
8. Ugras R.C., Altintas Y. Optimization of clamping conditions in thin-walled part machining to minimize forced vibrations, Part I: Model for the single tool-workpiece contact location // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2025. – Vol. 61. – P. 103–113. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.05.015.
9. Delport L.D., Conradie P.J.T., Oosthuizen G.A. Suitable clamping method for milling of thin-walled Ti6Al4V components // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 8. – P. 338–344. – DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.043.
10. Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: a review / H. Liu, C. Wang, T. Li, Q. Bo, K. Liu, Y. Wang // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 17 (4). – P. 55. – DOI: 10.1007/s11465-022-0711-5.
11. Yadav M.H., Mohite S.S. Controlling deformations of thin-walled Al 6061-T6 components by adaptive clamping // Procedia Manufacturing. – 2018. – Vol. 20. – P. 509–516. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.076.
12. An adaptive clamp system for deformation control of aerospace thin-walled parts / W. Zhou, F. Yu, J. Zhang, K. Huang, Z. Xu, X. Liu, Y. Ma, P. Feng, F. Feng // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 107. – P. 115–125. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.10.040.
13. Gang L. Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209 (6). – P. 2788–2793. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.029.
14. Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование влияния элементов режима и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей // Научно-технические в машиностроении. – 2024. – № 1 (151). – С. 23–29. – DOI: 10.30987/2223-4608-2024-23-29. – EDN: DADXIS.
15. A state-of-art review on chatter and geometric errors in thin-wall machining processes / G. Wu, G. Li, W. Pan, I. Raja, X. Wang, S. Ding // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 68, pt. A. – P. 454–480. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.055.



16. Identification of chatter in milling of Ti-6Al-4V titanium alloy thin-walled workpieces based on cutting force signals and surface topography / J. Feng, Z. Sun, Z. Jiang, L. Yang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 82. – P. 1909–1920. – DOI: 10.1007/s00170-015-7509-0.

17. Rakic S., Marjanovic U., Medic N. Advancements in smart manufacturing and Industry 4.0 // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15 (22). – P. 11903. – DOI: 10.3390/app152211903.

18. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool // *CIRP Annals*. – 2009. – Vol. 58 (2). – P. 588–607. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.005.

19. Current state and emerging trends in advanced manufacturing: process technologies / K. Raoufi, J.W. Sutherland, F. Zhao, A.F. Clarens, J.L. Rickli, Z. Fan, H. Huang, Y. Wang, W.J. Lee, N. Mathur, M.J. Triebe, S.S. Desabathina, K.R. Haapala // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 135. – P. 4089–4118. – DOI: 10.1007/s00170-024-14782-3.

20. Рыжикова Т.Н., Боровский В.Г. Исследование стратегических перспектив модернизации станкостроения // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2017. – Т. 16 (5). – С. 835–850. – DOI: 10.24891/ea.16.5.835.

21. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review // *Journal of Machine Engineering*. – 2018. – Vol. 18 (4). – P. 5–24. – DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

22. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

23. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // *CIRP Annals*. – 2008. – Vol. 57 (2). – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

24. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

25. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

26. Grzesik W., Ruszaj A. Hybrid manufacturing processes: Physical fundamentals, modelling and rational applications. – Cham: Springer, 2021. – 234 p. – ISBN 978-3-030-77106-5. – DOI: 10.1007/978-3-030-77107-2.

27. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатывающих технологий, интегрируемых на единой станочной базе // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 45–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.

28. Brecher C., Özdemir D. Integrative production technology: Theory and applications. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

29. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F. Manufacturing systems and technologies for the new frontier. – London: Springer-Verlag, 2008. – 556 p. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

30. Пирожков В.Е. Анализ систем хранения заготовительного материала титановых шарбаллонов. Проектирование автоматизированного участка хранения листового материала // *Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М)-2025): материалы III молодежной конференции (с международным участием)*, Москва, 16 мая 2025 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – С. 176–185. – EDN: XSBNFW.

31. Матвеев С.С. Автоматизация модуля гидроабразивной резки заготовок из титановых листов для изготовления шар-баллонов // *Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М)-2025): материалы III молодежной конференции (с международным участием)*, Москва, 16 мая 2025 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – С. 145–150. – EDN: KSNITZ.

32. Морозов А.А., Жаргалова А.Д. Совершенствование производственной системы для создания полусфер шар-баллонов из титановых листов // *Русский инженер: сборник тезисов III Всероссийского конгресса с международным участием*, Москва, 29–31 октября 2025 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – С. 127–128. – EDN: AOVPPZ.

33. Власов В.В. Роботизированный модуль контрольных операций производства изделий ракетно-космической техники // *Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М)-2025): материалы III молодежной конференции (с международным участием)*, Москва, 16 мая 2025 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – С. 114–118. – EDN: EBONFL.

34. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, I. Lazoglu // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

35. Колоскова А.В., Киселев И.А., Иванов И.И. Моделирование динамики процесса точения с уче-

том податливости обрабатываемой детали // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 70. – EDN: YPQINX.

36. Finite element method analysis and control strategy for machining deformation of thin-walled components / H. Ning, W. Zhigang, J. Chengyu, Z. Bing // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 139 (1–3). – P. 332–336. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00550-8.

37. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation / L. Lattanzi, R. Raffaelli, M. Peruzzini, M. Pellicciari // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2021. – Vol. 34 (6). – P. 567–597. – DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003.

38. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzing, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51 (11). – P. 1016–1022. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

39. Review of applications of Digital Twins and Industry 4.0 for machining / L.R.R. da Silva, D.Y. Pimenov, R.B. da Silva, A. Ercetin, K. Giasin // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2025. – Vol. 9 (7). – P. 211. – DOI: 10.3390/jmmp9070211.

40. Prediction of cutting force considering the influence of elastic deformation in ball end milling of thin-walled parts / W. Li, J. Ren, K. Shi, Y. Lu, J. Zhou // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Vol. 140 (7–8). – P. 4389–4403. – DOI: 10.1007/s00170-025-16557-w.

41. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: a review / Y. Bao, B. Wang, Z. He, R. Kang, J. Guo // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2022. – Vol. 35 (3). – P. 10–26. – DOI: 10.1016/j.cja.2021.01.026.

42. Design and technological aspects of integrating multi-blade machining and surface hardening on a single machine base / V. Skeeba, V. Ivancivsky, A. Chernikov, N. Martyushev, N. Vakhrushev, K. Titova // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (5). – P. 200. – DOI: 10.3390/jmmp8050200.

43. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 7 с.

44. Ezugwu E.O., Wang Z.M. Titanium alloys and their machinability: a review // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – Vol. 68 (3). – P. 262–274. – DOI: 10.1016/S0924-0136(96)00030-1.

45. Ulutan D., Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2011. – Vol. 51 (3). – P. 250–280. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.

46. Жаргалова А.Д., Шляхтин О.О. Методика автоматизированного выбора режимов резания при токарной обработке тонкостенных деталей // *Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП-2024): Вторая научно-практическая конференция (с международным участием): материалы конференции, Москва, 01 ноября 2024 г.* – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – С. 104–107. – EDN: RFVKNR.

47. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д. Автоматизация выбора рациональных режимов токарной обработки тонкостенных деталей // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2017. – № 2 (62). – С. 4. – DOI: 10.18698/2308-6033-2017-2-1587. – EDN: XIEUHR.

48. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 22–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32.

49. Жиляев С.В., Кугультинов Д.С. Влияние режимов резания на усадку стружки при точении титанового сплава ВТ6 // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2011. – № 3. – С. 48–50. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-rezaniya-na-usadku-struzhki-pri-tochenii-titanovogo-splava-vt6> (дата обращения: 06.01.2026).

50. О «мягких» режимах резания для обработки тонкостенных деталей / А.Д. Жаргалова, С.С. Гаврюшин, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2016. – Т. 8, № 6 (37). – С. 117. – EDN: XXYHIJ.

51. DN Solutions (Doosan Machine Tools). PUMA VTS series. Product brochure (PDF). – URL: https://www.dormacncsolutions.nl/images/brochures/doosan/draaibanken/PUMA_VTS_series.pdf (accessed: 19.01.2026).

52. EMAG. VLC 500/800/1200. Vertical multifunctional turning cells. Product brochure (PDF). – URL: https://oudereimer.nl/wp-content/uploads/2021/03/vlc-500-800-1200_en-1.pdf (accessed: 19.01.2026).

53. SprutCAM. SprutCAM X Documentation (v.17 User Manuals). – URL: <https://sprutcam.com/documentation/> (accessed: 19.01.2026).

54. Multi-process aerospace components: Residual stress modeling and deformation optimization / X. Jiang, N. Sun, F. Ren, X. Liu, W. Guo, M. Guo, X. Fan, J. Zhou // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2026. – Vol. 309. – P. 111077. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.111077.



55. *Sun S., Brandt M., Dargusch M.S.* Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50 (8). – P. 663–680. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

56. Thin-walled part machining process parameters optimization based on finite-element modeling of

workpiece vibrations / *S. Bolsunovskiy, V. Vermel, G. Gubanov, I. Kacharava, A. Kudryashov* // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 8. – P. 276–280. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.102.

57. Технологическая оснастка / *В.Г. Мальцев, А.П. Моргунов, Н.С. Морозова, Р.Л. Артюх*. – Омск: ОмГТУ, 2019. – 134 с. – ISBN 978-5-8149-2951-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Computer simulation and process engineering for machining thin-walled titanium hemispheres as part of a hybrid robotic module

Ayagma Zhargalova^{1, a, *}, Vadim Skeebe^{2, b, **}, Gleb Drach^{1, c}, Alexey Morozov^{1, d},
 Kristina Titova^{2, e}, Semyon Papko^{2, f}, Ivan Yulusov^{2, g}

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmstu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru;
^c <https://orcid.org/0009-0005-7618-2896>, drach1254@gmail.com; ^d <https://orcid.org/0009-0002-1846-7592>, 2809322@gmail.com;
^e <https://orcid.org/0000-0002-2708-3171>, krispars@yandex.ru; ^f <https://orcid.org/0009-0004-4512-5963>, papko.duty@yandex.ru;
^g <https://orcid.org/0009-0006-7566-6722>, yulusov.2017@stud.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 March 2026

Revised: 07 April 2026

Accepted: 11 April 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Spherical pressure vessel
 VT6 titanium alloy (Ti-6Al-4V)
 Thin-walled hemisphere
 Hybrid equipment
 Robotic module
 Manufacturing process
 Process route sheet
 Process tooling and fixtures
 Computer simulation
 SprutCAM

Funding

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSUN-2026-0005).

ABSTRACT

Introduction. In aerospace engineering, thin-walled titanium spherical pressure vessels for high-pressure helium storage are manufactured by welding two precision-machined hemispheres. The geometric accuracy of the spherical surfaces and weld edge preparation determine leak tightness and service life under operating pressures up to 34 MPa and temperatures down to –196 °C. Due to their low stiffness, thin-walled hemispheres make machining critically dependent on locating charts, clamping forces, and cutting conditions. In the context of *Industry 4.0* and the growing demand for hybrid equipment that integrates mechanical and surface-thermal operations, the development of modular robotic cells providing multifunctional machining with fewer re-clamping operations and increased flexibility has become highly relevant. However, existing design methodologies often fail to account for the multitasking nature, the complexity of preliminary studies, and the requirements for modularity and flexibility. **The purpose of this work** is to develop a machining process for thin-walled titanium hemispheres of spherical pressure vessels using computer simulation that ensures compliance with spherical surface accuracy and weld edge preparation requirements, and to improve machining efficiency by minimizing deformation risk, reducing the number of re-clamping operations, and shortening process planning time when integrating the process into a modular robotic cell. **Methods.** Design and manufacturing requirements for the hemispheres were analyzed; cutting conditions were calculated taking into account the specific features of the titanium alloy *Ti-6Al-4V* machining; equipment was selected through a comparative assessment based on production efficiency criteria; and the proposed process was verified in the *SprutCAM* computer-aided process planning (CAPP) system, considering equipment kinematics. **Results and Discussion.** Surface finish and accuracy requirements were established: *Ra* 0.8 μm for the inner spherical surface and *Ra* 3.2 μm for the outer spherical surface. A process route sheet was developed to minimize re-clamping operations and reduce the risk of thin-walled shell deformation. Based on production efficiency criteria, the *DN Solutions PUMA VTS 1214M* vertical turn-mill center was selected, enabling combined turning and milling operations in a single setup, consistent with integral machining on a *CNC* lathe platform. A locating chart using a special ring-type axial clamping fixture was developed and visualized. Machining simulation confirmed the feasibility of the process route, correct setup planning, and the absence of tool-workpiece-fixture collisions, and indicated the potential for rapid process implementation. **Conclusions.** The results contribute to the development of theoretical foundations and conceptual approaches for designing hybrid machine tools that integrate mechanical and surface-thermal processing operations.

For citation: Zhargalova A.D., Skeebe V.Yu., Drach G.A., Morozov A.A., Titova K.A., Papko S.S., Yulusov I.S. Computer simulation and process engineering for machining thin-walled titanium hemispheres as part of a hybrid robotic module. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 157–178. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-157-178. (In Russian).

* Corresponding author

Zhargalova Ayagma D., Senior Lecturer
 N. E. Bauman Moscow State Technical University,
 5, 2nd Baumanskaya St., Building 1,
 105005, Moscow, Russian Federation
 Tel.: +7 903 177-52-38, e-mail: azhargalova@bmstu.ru

** Corresponding author

Skeebe Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel.: +7 383 346-17-79, e-mail: skeebe_vadim@mail.ru

References

1. Lomakin I.V., Ryazantsev A.Yu., Yukhnovich S.S., Shirokzhukhova A.A. Sozdanie peredovoi tekhnologii i oborudovaniya dlya izgotovleniya titanovykh shar-ballonov [Development of advanced technology and equipment for manufacture of titanium spherical vessels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 37–43. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-12-37-43.
2. GOST 19807–91. *Titan i splavy titanovye deformiruemye. Marki* [State Standard 19807–91. Wrought titanium and titanium alloys. Grades]. Moscow, Standards Publ., 1991. 6 p.
3. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49 (7–8), pp. 561–568. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.
4. Qi S., Yan S., Xu J., Sun Y. Predictive modeling of deformation induced by residual stress for thin-walled parts in double-sided alternating precision turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, vol. 146, pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.04.085.
5. Sun H., Zhao J., Zheng Z., Jiang Y., Jin X., Deng S., Tang Y., Zhang X. A review of the deformation mechanism and control of low stiffness thin-walled parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2025, vol. 60, pp. 322–355. DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.05.007.
6. Li Z., Zeng Z., Yang Y., Ouyang Z., Ding P., Sun J., Zhu S. Research progress in machining technology of aerospace thin-walled components. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 119, pp. 463–482. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.03.111.
7. Wang L., Zhao H. A short review on machining deformation control of aero-engine thin-walled casings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121 (5), pp. 2971–2985. DOI: 10.1007/s00170-022-09546-w.
8. Ugras R.C., Altintas Y. Optimization of clamping conditions in thin-walled part machining to minimize forced vibrations, Part I: Model for the single tool-workpiece contact location. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2025, vol. 61, pp. 103–113. DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.05.015.
9. Delport L.D., Conradie P.J.T., Oosthuizen G.A. Suitable clamping method for milling of thin-walled Ti6Al4V components. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 8, pp. 338–344. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.043.
10. Liu H., Wang C., Li T., Bo Q., Liu K., Wang Y. Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: a review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, vol. 17 (4), p. 55. DOI: 10.1007/s11465-022-0711-5.
11. Yadav M.H., Mohite S.S. Controlling deformations of thin-walled Al 6061-T6 components by adaptive clamping. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 509–516. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.076.
12. Zhou W., Yu F., Zhang J., Huang K., Xu Z., Liu X., Ma Y., Feng P., Feng F. An adaptive clamp system for deformation control of aerospace thin-walled parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 107, pp. 115–125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.10.040.
13. Gang L. Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209 (6), pp. 2788–2793. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.029.
14. Unyanin A.N., Chudnov A.V. Issledovanie vliyaniya elementov rezhima i shaga zub'ev frezy na tekhnologicheskie parametry i temperaturnoe pole protsessa obrabotki zagotovok tonkostennykh detalei [Investigation of mode elements effect and the influence of milling cutter teeth space on technological parameters and temperature field of work on a thin-walled parts workpiece]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2024, no. 1, pp. 23–29. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-23-29.
15. Wu G., Li G., Pan W., Raja I., Wang X., Ding S. A state-of-art review on chatter and geometric errors in thin-wall machining processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, pt. A, pp. 454–480. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.055.
16. Feng J., Sun Z., Jiang Z., Yang L. Identification of chatter in milling of Ti-6Al-4V titanium alloy thin-walled workpieces based on cutting force signals and surface topography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1909–1920. DOI: 10.1007/s00170-015-7509-0.
17. Rakic S., Marjanovic U., Medic N. Advancements in smart manufacturing and Industry 4.0. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15 (22), p. 11903. DOI: 10.3390/app152211903.
18. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool. *CIRP Annals*, 2009, vol. 58 (2), pp. 588–607. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.005.

19. Raoufi K., Sutherland J.W., Zhao F., Clarens A.F., Rickli J.L., Fan Z., Huang H., Wang Y., Lee W.J., Mathur N., Triebe M.J., Desabathina S.S., Haapala K.R. Current state and emerging trends in advanced manufacturing: process technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 135, pp. 4089–4118. DOI: 10.1007/s00170-024-14782-3.
20. Ryzhikova T.N., Borovskii V.G. Issledovanie strategicheskikh perspektiv modernizatsii stankostroeniya [Exploring the strategic perspectives for machine tool industry modernization]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16 (5), pp. 835–850. DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
21. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review. *Journal of Machine Engineering*, 2018, vol. 18 (4), pp. 5–24. DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.
22. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
23. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57 (2), pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
24. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.
25. Skeebe V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metallobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
26. Grzesik W., Ruszaj A. *Hybrid manufacturing processes: Physical fundamentals, modelling and rational applications*. Cham, Springer, 2021. 234 p. ISBN 978-3-030-77106-5. DOI: 10.1007/978-3-030-77107-2.
27. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obrabatyvayushchikh tekhnologii, integriruemyykh na edinoi stanochnoi baze [Improving the efficiency of surface-thermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.
28. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: Theory and applications*. Cham, Springer International Publishing, 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.
29. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier*. London, Springer-Verlag, 2008. 556 p. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
30. Pirozhkov V.E. [Analysis of titanium balloon blank material storage systems. Designing an automated sheet material storage area]. *Kompleksnaya avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva (KAPP(M)-2025)* [Integrated Automation of Design and Manufacturing (IADM(Y)-2025)]. Proceedings of the III Youth Conference (with international participation). Moscow, 2025, pp. 176–185. (In Russian).
31. Matveev S.S. [Automation of the waterjet cutting module for titanium sheet blanks used in the production of sphere-tanks]. *Kompleksnaya avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva (KAPP(M)-2025)* [Integrated Automation of Design and Manufacturing (IADM(Y)-2025)]. Proceedings of the III Youth Conference (with international participation). Moscow, 2025, pp. 145–150. (In Russian).
32. Morozov A.A., Zhargalova A.D. [Improvement of the production system for manufacturing sphere-balloon hemispheres from titanium sheets]. *Russkii inzhener* [Russian Engineer]. Abstracts of the III All-Russian Congress with International Participation. Moscow, 2025, pp. 127–128. (In Russian).
33. Vlasov V.V. [A robotic module for control operations for the production of rocket and space technology products]. *Kompleksnaya avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva (KAPP(M)-2025)* [Integrated Automation of Design and Manufacturing (IADM(Y)-2025)]. Proceedings of the III Youth Conference (with international participation). Moscow, 2025, pp. 114–118. (In Russian).
34. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
35. Koloskova A.V., Kiselev I.A., Ivanov I.I. Modelirovanie dinamiki protsessa tocheniya s uchetom podatlivosti obrabatyvaemoi detali [Modeling of the turning process dynamics, taking into the account the compliance of the workpiece]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» = Online Journal «Naukovedenie»*, 2017, vol. 9, no. 2, p. 70.

36. Ning H., Zhigang W., Chengyu J., Bing Z. Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin-walled components. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 139 (1–3), pp. 332–336. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00550-8.
37. Lattanzi L., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, vol. 34 (6), pp. 567–597. DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003.
38. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51 (11), pp. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
39. da Silva L.R.R., Pimenov D.Y., da Silva R.B., Ercetin A., Giasin K. Review of applications of Digital Twins and Industry 4.0 for machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, vol. 9 (7), p. 211. DOI: 10.3390/jmmp9070211.
40. Li W., Ren J., Shi K., Lu Y., Zhou J. Prediction of cutting force considering the influence of elastic deformation in ball end milling of thin-walled parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 140 (7–8), pp. 4389–4403. DOI: 10.1007/s00170-025-16557-w.
41. Bao Y., Wang B., He Z., Kang R., Guo J. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: a review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, vol. 35 (3), pp. 10–26. DOI: 10.1016/j.cja.2021.01.026.
42. Skeebe V., Ivancivsky V., Chernikov A., Martyushev N., Vakhrushev N., Titova K. Design and technological aspects of integrating multi-blade machining and surface hardening on a single machine base. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (5), p. 200. DOI: 10.3390/jmmp8050200.
43. GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [State Standard 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standards Publ., 1973. 7 p.
44. Ezugwu E.O., Wang Z.M. Titanium alloys and their machinability: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 68 (3), pp. 262–274. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)00030-1.
45. Ulutan D., Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, vol. 51 (3), pp. 250–280. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.
46. Zhargalova A.D., Shlyachtin O.O. [Methodology for automated selection of cutting modes when turning thin-walled parts]. *Kompleksnaya avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva (KAPP-2024)* [Integrated Automation of Design and Manufacturing (KAPP-2024)]. Proceedings of the II Youth Conference (with international participation). Moscow, 2025, pp. 104–107. (In Russian).
47. Ereimeikin P.A., Zhargalova A.D. Avtomatizatsiya vybora ratsional'nykh rezhimov tokarnoi obrabotki tonkostennykh detalei [Automation of assignment of rational thin-walled parts turning mode]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 2, p. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-2-1587.
48. Ereimeikin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. Raschetno-eksperimental'naya otsenka tekhnologicheskikh deformatsii pri «myagkikh» rezhimakh tokarnoi obrabotki tonkostennykh detalei [Empirical evaluation of technological deformations for “soft” cutting modes during thin-walled parts turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 22–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32.
49. Zhilyaev S.V., Kugultinov D.S. Vliyaniye rezhimov rezaniya na usadku struzhki pri tochenii titanovogo splava VT6 [The Influence of cutting modes on chips shrinkage when turning vt6 titanium alloy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2011, no. 3, pp. 48–50. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-rezhimov-rezaniya-na-usadku-struzhki-pri-tochenii-titanovogo-splava-vt6> (accessed 06.01.2026).
50. Zhargalova A.D., Gavriushin S.S., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. O «myagkikh» rezhimakh rezaniya dlya obrabotki tonkostennykh detalei [About soft modes of cutting for processing thin-walled parts]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» = Online Journal «Naukovedenie»*, 2016, vol. 8 (6), p. 117.
51. DN Solutions (Doosan Machine Tools). *PUMA VTS Series*. Product brochure (PDF). Available at: https://www.dormacncsolutions.nl/images/brochures/doosan/draaibanken/PUMA_VTS_series.pdf (accessed 19.01.2026).
52. EMAG. *VLC 500/800/1200. Vertical multifunctional turning cells*. Product brochure (PDF). Available at: https://oudereimer.nl/wp-content/uploads/2021/03/vlc-500-800-1200_en-1.pdf (accessed 19.01.2026).

53. SprutCAM. *SprutCAM X Documentation (v.17 User Manuals)*. Available at: <https://sprutcam.com/documentation/> (accessed 19.01.2026).
54. Jiang X., Sun N., Ren F., Liu X., Guo W., Guo M., Fan X., Zhou J. Multi-process aerospace components: Residual stress modeling and deformation optimization. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2026, vol. 309, p. 111077. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.111077.
55. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (8), pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.
56. Bolsunovskiy S., Vermel V., Gubanov G., Kacharava I., Kudryashov A. Thin-walled part machining process parameters optimization based on finite-element modeling of workpiece vibrations. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 276–280. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.102.
57. Maltsev V.G., Morgunov A.P., Morozova N.S., Artyukh R.L. *Tekhnologicheskaya osnastka* [Technological equipment]. Omsk, OmSTU Publ., 2019. 134 p. ISBN 978-5-8149-2951-8.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).