

УДК 629

Методы испытания стыковочных систем космических аппаратов

Савчишкина Юлия Александровна

sav4ishkinayuliya@gmail.com

Янко Мария Алексеевна

yanko@bmstu.ru

SPIN-код: 9107-0563

МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Приведен анализ современных методик испытаний стыковочных узлов космических аппаратов. Особое внимание уделено специализированным стендам, которые показали свою эффективность в оценке критических параметров: контроле температурных и динамических характеристик. Направления улучшения испытательных стендов связаны с повышением точности моделирования космических условий на Земле. Отмечена необходимость усовершенствования существующих технологий к перспективным космическим программам.

Ключевые слова: стыковочные системы, космические аппараты, испытательные стенды, динамические стенды, моделирование стыковки

Test methods for docking systems of spacecraft

Savchishkina Yulia Aleksandrovna

sav4ishkinayuliya@gmail.com

Yanko Maria Alekseevna

yanko@bmstu.ru

SPIN-code: 9107-0563

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article provides an analysis of modern testing methods for spacecraft docking mechanisms. Special attention is paid to specialized test benches that have proven effective in evaluating critical parameters, such as monitoring thermal and dynamic characteristics. Improvements in testing facilities are aimed at enhancing the accuracy of simulating space conditions on Earth. The need to upgrade existing technologies for future space programs is highlighted.

Keywords: docking systems, spacecraft, test benches, dynamic test ring, docking simulation

Введение. Стыковка космических аппаратов остается одной из наиболее важных операций в ракетно-космической отрасли, требующей высокой надежности всех элементов стыковочной системы [1]. Наземные испытания играют ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности этого процесса, позволяя выявлять и устранять потенциальные отказы на этапе разработки.

Материалы и методы. Испытания стыковочных узлов космических аппаратов представляет собой сложный процесс, направленный на решение ключевых задач: подтверждение соответствия проектных характеристик с реальными эксплуатационными условиями; выявления производственных дефектов; определение прочностных пределов [2]. Эффективность испытаний зависит

от предварительного анализа, который должен охватывать конструктивные особенности системы, критические точки потенциальных отказов, характер внешних воздействий (температура, вибрация, вакуум), а также взаимодействие с другими бортовыми системами [3].

Современная система испытаний стыковочных узлов включает два основных класса проверок:

- автономные проверки: контрольные проверки, отработанные тесты отдельных узлов и систем в целом, зачетные испытания, приемно-сдаточные проверки;

- комплексные испытания: наземные тесты на контрольно-испытательных станциях, полигонные испытания, летные испытания в реальных условиях [4].

Контрольные и приемно-сдаточные испытания стыковочных узлов представляют собой начальный и завершающий этапы проверки качества изготовления и сборки космических изделий. Данный комплекс проверок направлен на выявление производственных дефектов, возникающих вследствие индивидуальных особенностей изготовления деталей, включающий в себя различного рода погрешности и вариативности характеристик используемых материалов. Данный комплекс содержит основные группы испытаний: 1) виброиспытания; 2) электротехнические испытания; 3) функциональные испытания; 4) температурные испытания; 5) динамические испытания; 6) испытания на герметичность [5]. Перечисленные процедуры позволяют выявить скрытые дефекты взаимодействия узлов, проверить соответствие критических размеров и главное — подтвердить работоспособность механизмов стыковки.

Для моделирования реальных условий работы стыковочных узлов в наземных условиях применяется комплекс специализированного испытательного оборудования. На данных стендах воспроизводится полный цикл стыковочного механизма: процесс сближения и стыковки, работа амортизационных систем, функционирование приводных механизмов, взаимодействие всех элементов системы [6]. Особую сложность представляет наземное моделирование относительного движения космических аппаратов в условиях гравитации. В следствие чего эти испытания нуждаются в особом внимании к разработкам и совершенствованию динамических стендов [7].

В стыковочных системах космических аппаратов амортизаторы играют ключевую роль [8]. Они обеспечивают безопасное и плавное соединение модулей, гасят ударные нагрузки, возникающие при контакте двух объектов. Испытания амортизаторов проводят с целью всесторонней проверки работоспособности амортизирующих элементов в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным.

Горизонтальный испытательный стенд для системы АПАС. Сложность процесса амортизации при использовании периферийного стыковочного механизма требует специализированного испытательного стенда. Особенность стенда — тележка с дополнительным грузом, момент инерции которого рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{I_{rx}} = \frac{1}{I_{x1}} + \frac{1}{I_{x2}}, \quad (1)$$

где I_{rx} — момент инерции дополнительного груза; I_{x1} — инерция груза; I_{x2} — инерция компенсатора.

На платформе закрепляется активный модуль АПАС, тогда как пассивный элемент устанавливается на качающиеся грузы с регулируемым положением. Это позволяет определять углы между продольными осями аппаратов в момент контакта, что важно для оценки взаимодействия направляющих колец.

Данный стенд обеспечивает три степени свободы и реализовывает основные сценарии взаимодействия: 1) центральный удар; 2) удар с креном; 3) контакт направляющих элементов; 4) взаимодействие направляющих с кольцом; 5) холостой удар [9].

Для создания нагрузок используется система с подвесным грузом и тросовым приводом. Дополнительный механизм позволяет имитировать работу двигателей РСУ. Эквивалентная тяга рассчитывается по формуле (2) и активируется по сигналу датчика касания АПАС:

$$F_{xэ}^y = F_x^y \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (2)$$

где $F_{xэ}^y$ — эквивалентная тяга; F_x^y — тяга; m_1 — масса качающегося груза; m_2 — масса компенсатора.

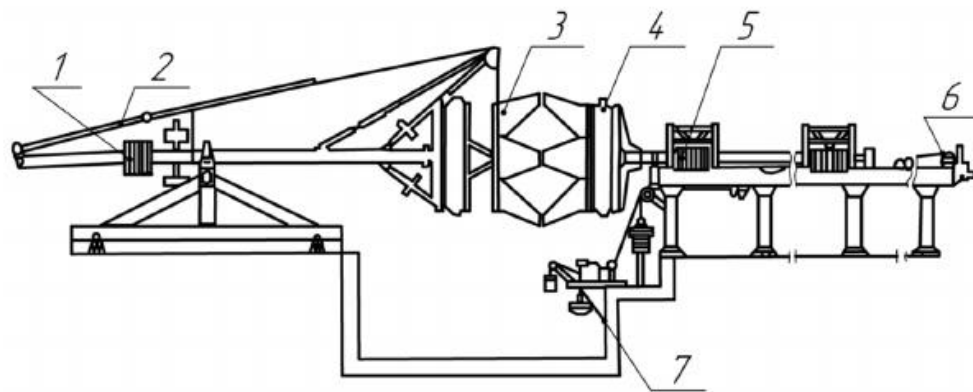


Рис. 1. Горизонтальный стенд для АПАСа:

1 — качающийся груз; 2 — компенсатор веса кольца; 3 — активный АПАС; 4 — пассивный АПАС; 5 — груз, вращающийся по крену; 6 — спусковой механизм; 7 — имитатор РСУ

Данная схема обеспечивает комплексное тестирование стыковочных систем в контролируемых условиях с возможностью изменения начальных условий.

Компактные динамические испытательные стенды [9–11]. Современные испытательные стенды для стыковочных агрегатов проектируются с учетом ограничений по габаритам термовакуумных камер. Специализированные установки, в которых для моделирования динамических процессов исполь-

зуются маховики и механизмы преобразования вращательного движения в поступательное. Величина момента инерции маховика определяется из равенства кинетических энергий движения эквивалентной массы и вращения маховика (формула 3):

$$I_m = m_{\text{э}} \left(\frac{s}{2\pi i_p} \right)^2, \quad (3)$$

где I_m — момент инерции маховика; $m_{\text{э}}$ — эквивалентная масса; s — шаг винта; i_p — передаточное число

На данном стенде воспроизводится центральный удар. При его воспроизведении маховик раскручивается до максимально угловой скорости:

$$\omega_m = \frac{2\pi i_p V_x^0}{s}, \quad (4)$$

где ω_m — максимальная угловая скорость; i_p — передаточное число; V_x^0 — скорость при ударе; s — шаг винтовой линии

Конструкция портативного испытательного комплекса включает в себя приводной маховик, теплоизолированный корпус, электросиловое оборудование и испытательный модуль. Соединение маховика с исполнительным механизмом осуществляется через управляемую муфту, момент которой рассчитывается из условий создания максимально возможной силы удара.

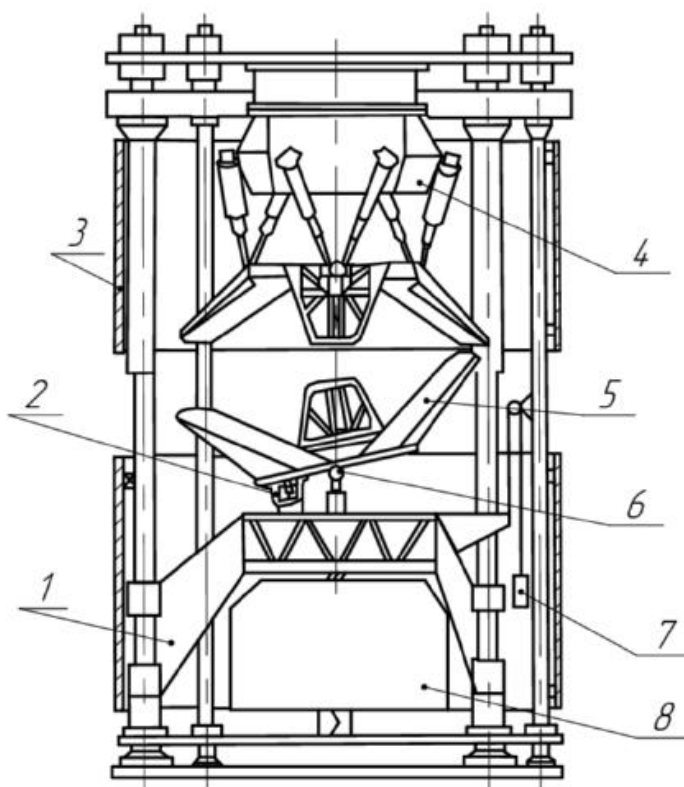


Рис. 2. Динамический стенд для испытаний АПАСа в термобарокамере:

1 — подвижная ферма; 2 — привод наклона; 3 — тепловой экран; 4 — испытуемый АПАС;
5 — ответное кольцо; 6 — шарнир; 7 — противовес; 8 — имитатор инертности

В ходе испытаний устанавливается скорость вращения маховика, параметры деформации амортизаторов, ударные ускорения и температурные показатели. Стенд позволяет моделировать взаимодействие направляющих элементов и их деформации при нагрузках.

Позиционирование пассивного стыковочного узла осуществляется двумя дистанционно управляемыми приводами. Система терморегуляции, состоящая из нагревателя и системы охлаждения, обеспечивает поддержание заданных температурных режимов. Измерительный комплекс определяет перемещения исполнительных элементов, температурных параметров и динамических характеристик процесса стыковки.

Результаты. Проведенный анализ существующих методик испытаний стыковочных систем космических аппаратов показал, что современные испытательные стенды обеспечивают комплексную проверку всех особо важных параметров стыковочных узлов. В настоящее время особое внимание уделяется точности воспроизведения условий при непосредственной эксплуатации изделия. Результаты проведенного анализа опубликованных источников подтверждает положение о том, что разработанные методики испытаний позволяют с высокой долей точности прогнозировать поведение стыковочных узлов при эксплуатации.

Обсуждение полученных результатов. Рассмотренные в ходе анализа материалы свидетельствуют о высоком уровне развития технологий испытания стыковочных систем. Особого внимания заслуживают специализированные стенды, включающие как проверки отдельных узлов при взаимодействии между собой, так и всей системы в целом. Проведенный анализ подтверждает, что современные методики испытаний стыковочных механизмов обеспечивают необходимый уровень надежности и безопасности ракетно-космической техники, однако требуют постоянного совершенствования в связи с усложнением задач на орбите.

Заключение. Современные системы испытаний представляют собой совокупный подход, сочетающий проверки отдельных компонентов и комплексные испытания в условиях, максимально приближенных к условиям на орбите. Специализированные испытательные стенды — горизонтальный стенд АПАС, компактный динамический стенд с маховиковыми системами — доказали свою эффективность для проверки всех критически важных параметров стыковочных систем. Стоит отметить, что для поддержания требуемых стандартов качества и соответствия прогрессу необходимо стремиться к повышению точности моделирования условий космического пространства, внедрению автоматизации и созданию универсальных стендов.

Список источников

- [1] Ван С. Краткий обзор механизма стыковки в космосе. *Международ. конф. по сервисной робототехнике (ICoSR): матер.* Шанхай, Китай, 2023, с. 61–66.
- [2] Макаров А.А. *Наземные испытания ракетно-космической техники: опыт отработки ракетной и ракетно-космической техники 1949–1999 гг.* Пересвет, НИИХИММАШ, 2001, 303 с.

- [3] Бахвалов Ю.О. *Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность*. Москва, АИР, 2015, 227 с.
- [4] Кубрак М.В., Леонов С.Н. Современные системы испытаний ракетно-космической техники. *Решетневские чтения. Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2017, № 21-1.
- [5] ГОСТ Р 51143–98. *Комплексы стартовые и технические ракетно-космических комплексов. Общие требования к испытаниям и приемке*. Москва, Госстандарт России, 1998, 78 с.
- [6] Беляков И.Т., Зернов И.А., Антонов Е.Г. *Технология сборки и испытаний космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1990, 352 с.
- [7] Абрамов И.П., Алдашкин И.В., Алексеев Э.В. и др. *Ракетно-космическая техника. Т. IV-22*. Москва, Машиностроение, 2014, 548 с.
- [8] Власенков В.М., Хегай Л.Д. *Разработка и исследование многокомпонентных динамических испытательных стендов*. Владивосток, Дальнаука, 2004, 206 с.
- [9] Сыромятников В.С., Александров А.П., Басов И.М. *Амортизационный периферийный агрегат стыковки (АПАС) и демпфер амортизационно-приводной системы для него*. П 2131829 С1 РФ, 1999, 9 с.
- [10] Сыромятников В.С. *Стыковочные устройства космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1984, 216 с.
- [11] Ерохин М.Н. *Динамика и прочность машин*. Москва, Машиностроение, 1995, 624 с.

Содержание

Секция 3. Технологии и оборудование механической, физико-технической, комбинированной обработки заготовок и сборки изделий в машиностроении	3
<i>Бабаян В.В., Акулиничев П.Д.</i> Влияние параметров абразивного материала на статическое давление при потоковом методе обработки свободным абразивом	5
<i>Болсуновский С.А., Пупчин В.А., Качарава И.Н.</i> Разработка технологии высокоскоростной фрезерной обработки лопатки газотурбинного двигателя на основе расчета отжима и частот колебаний обрабатываемой заготовки методом конечного элемента	11
<i>Букаша А.Ю., Зубков С.Н., Зубков Н.Н., Карельский А.С., Гроссман М.Ф.</i> Исследование силовых и энергетических параметров процесса удаления полипропиленового защитного покрытия на стальной основе со сварным швом	15
<i>Грубый С.В., Карельский А.С.</i> Методика расчета характеристик изнашивания твердосплавных режущих инструментов	27
<i>Денисов В.А., Евсюков А.А.</i> Восстановление золотников гидравлического распределителя Bosch Rexroth электроискровой обработкой композитным электродом с углеродными нанотрубками	33
<i>Деревянченко С.А.</i> Технология и оборудование для электрохимической обработки лопаток моноколес газотурбинных двигателей	37
<i>Захаржевский П.А., Титов С.А.</i> Разработка расчетной модели полимерного композиционного материала, учитывающей внутренние повреждения кромок, образующихся при механической обработке	46
<i>Зубков Н.Н., Гроссман М.Ф.</i> Исследование капиллярного давления медных фитильных структур тепловых труб, получаемых деформирующим резанием	53
<i>Караванова А.Г., Яковлева А.П., Албагачиев А.Ю.</i> Разработка модели оборудования для последовательной отделочной обработки блоков шестерен авиационных двигателей	63
<i>Кононенко А.С., Нотфуллин И.Ф.</i> Обоснование выбора способа подготовки поверхности перед нанесением анаэробного герметика»	67
<i>Кононенко А.С., Нотфуллин И.Ф.</i> Оценка эффективности волоконного и СО ₂ -лазеров при очистке поверхностей фланцев от анаэробного герметика	72
<i>Левченков Д.М., Гончаров А.А.</i> Влияние термической обработки на качество поверхности, полученной методом фрезерования	77
<i>Леквешвили М.А.</i> Расчетное определение геометрических параметров зубьев режущей части концевых фрез	82

<i>Максимов И.С., Галанский С.А., Рахчеев В.Г.</i> Установление технологических параметров шлифования рельсов с использованием композиционных абразивных инструментов	88
<i>Малькова Л.Д., Никитин А.С.</i> Технологические особенности обработки лопаток компрессора газотурбинных установок	94
<i>Марков Н.А., Угорова С.В.</i> Вопросы микроклимата термоконстантных помещений в цехах обработки и сборки изделий	99
<i>Морозов И.П., Щелокова П.Ю.</i> Влияние формы главной задней поверхности на ресурс сверла	104
<i>Нещадим С.В., Мальков О.В.</i> Моделирование резьбофрезерования	108
<i>Седых М.И., Балыков П.А.</i> Длительность сборочных операций с учетом физиологии рабочих	114
<i>Смирнов А.А.</i> Методика испытания конструкции фрез по критерию постоянства составляющей силы резания	121
<i>Татаринцев И.В., Кузнецов В.П., Воропаев В.В., Кузнецов С.В.</i> Влияние подачи и количества проходов инструмента на упрочнение поверхностного слоя стали AISI 420 выглаживанием синтетическим алмазом	127
<i>Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В.</i> Технологичность конструкции зубчатых колес ГТД: роль конструкторско-технологического сотрудничества и цифрового двойника	137
<i>Шибанов А.В.</i> Повышение стойкости режущего инструмента на операции удаления внутреннего грата в электросварных трубах	143
Секция 4. Инженерия поверхности и функциональные покрытия, технологии ремонта, восстановления и продления ресурса изделий и оборудования в машиностроении	149
<i>Денисов В.А., Попов Н.А.</i> Восстановление изношенных рабочих поверхностей гильз цилиндров комбинированным методом	151
<i>Коберник Н.В., Панкратов А.С., Андриянов Ю.В.</i> Влияние схемы ввода присадочной порошковой проволоки с наполнителем из плакированного TiC на структуру наплавленного металла	156
<i>Кононенко А.С., Абдоков В.Э.</i> Повышение адгезионной прочности полимерных составов холодного отверждения, используемых при восстановлении опорных поверхностей валов	161
<i>Кузнецов И.С.</i> Моделирование процесса электроэрозионного изнашивания электрода-инструмента при электроискровой обработке	165
<i>Лежнин Н.В., Макаров А.В., Котельников А.Б., Вопнерук А.А., Чалина М.А.</i> Комплексная технология на основе сварки трением с перемешиванием для восстановления исходной геометрии изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ	171
<i>Попов Н.А., Чавдаров А.В.</i> Разработка автоматизированной установки для напыления рабочей поверхности гильз цилиндров	177
<i>Серов А.В.</i> О влиянии никелевых промежуточных слоев на сопротивление зоны соединения при электроконтактной приварке	183

<i>Серов А.В., Шихранов Н.С.</i> Разработка технологии получения покрытий с заданной шероховатостью методом холодного газодинамического напыления при последующей механической обработке	190
<i>Серов А.В., Немировский Р.И.</i> Модернизация системы приводов установки для электроконтактной приварки «011-1-10» «Ремдеталь»	196
<i>Слинко Д.Б., Афанасьев А.В.</i> Обоснование выбора технологических параметров упрочнения плужных лемехов электродуговой наплавкой	203
<i>Слинко Д.Б., Федоренко Д.А.</i> Совершенствование технологии плазменно-порошковой наплавки дисковых борон	209
<i>Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю.</i> Обоснование нового состава для плазменного нанесения композитных слоев	217
<i>Федоров С.К., Федорова Л.В., Меликянц Д.Г., Малышев Н.С.</i> Обзор способов обеспечения шероховатости поверхности и перспективы применения электромеханической поверхностной закалки	223
<i>Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Хуснетдинов Т.Р., Романова К.Р.</i> Электромеханическая обработка резьбы М93х2 корпусов установок электроцентробежных насосов	229
<i>Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Коряков М.Н., Хуснетдинов Т.Р.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния витков резьбы в Ansys Workbench и результаты применения электромеханической обработки витков	235
<i>Шиповалов А.Н., Юдин В.М., Лепилов Е.В.</i> Плазмотроны для сварки и наплавки	241
Секция 5. Лазерные и аддитивные технологии в машиностроении	245
<i>Аракелян А.А., Ронжин Д.А.</i> Исследование влияния параметров лазерной порошковой наплавки на качество износостойкого слоя контактной поверхности рабочих лопаток ТВД	247
<i>Дубровин Г.Н., Самарин П.Е.</i> Применение наносекундных волоконных лазеров с длиной волны 1064 нм в технологии гидролазерной резки	254
<i>Закирова К.С., Мельникова М.А., Мельников Д.М., Холопов А.А.</i> Особенности проектирования 3D-моделей для аддитивного производства в условиях Индустрии 4.0	261
<i>Локтев А.С., Печников И.С.</i> Лазерное термоупрочнение нежестких валов насосных агрегатов	269
<i>Петрищев Д.Ю., Петров П.А.</i> Методика определения компенсации пучка лазерного луча и масштабного коэффициента при изготовлении металлических образцов методом SLM	276
<i>Старков И.С., Петров П.А.</i> Определение формы образца для исследования эффекта эрозии при 3D-печати методом селективного лазерного сплавления	284
<i>Хохлов А.В.</i> Анализ актуальных исследований в области применения машинного обучения для оптимизации процессов в аддитивном производстве	291
<i>Шепелев А.Е., Солохин С.А., Шилов И.В., Еришков М.Н.</i> Обработка аддитивно произведенных металлических материалов лазерными импульсами сложной временной формы	300

Секция 6. Метрологическое обеспечение машиностроительных производств.

Контроль и диагностика изделий и оборудования в машиностроении	307
<i>Гейко И.П., Зиняев В.В.</i> Формирование цифровой копии крупногабаритных элементов летательных аппаратов, имеющих аэродинамический профиль по результатам лазерного сканирования	309
<i>Николаева А.П., Тумакова Е.В.</i> Метрологическое обеспечение бесконтактных систем измерения линейной скорости в промышленности	316
<i>Яковлев М.Г., Ширваньянц Г.Г., Газина П.А.</i> Контроль поверхностных остаточных напряжений в деталях ГТД	322

Секция 7. Управление жизненным циклом изделий машиностроения, автоматизация и цифровизация производства 325

<i>Гун И.Г., Воротников М.Ю., Смирнов А.В.</i> Метод оценки и выбор поставщика на основе комбинированного подхода	327
<i>Девятков Д.А.</i> Автоматизация векторизации 2D-чертежей	332
<i>Лагута В.С.</i> Вариативные и вариантные технологические процессы в проектировании производственных систем	338
<i>Рослов П.Е., Марков Н.А.</i> Система обеспечения лазерной безопасности	345
<i>Сальников В.С., Трушин Н.Н.</i> Ресурсный подход к обоснованию оценок эффективности энергопотребления технологических систем	350
<i>Чуприна Е.Д., Никоноров А.И.</i> Поддержка выбора технологических решений по механической обработке деталей при помощи метода PROMETHEE	358

Секция 8. Технология ракетно-космического машиностроения 323

<i>Белова М.С.</i> Представление результатов и анализ обработки металлических материалов точением гидроабразивной струей	365
<i>Болсуновский С.А., Пупчин В.А.</i> Повышение производительности высокоскоростного фрезерования вафельного фона обечаек корпуса ракеты-носителя с использованием инструментальных средств измерения амплитудно-частотных характеристик шпиндельной группы с инструментом	368
<i>Галиновский А.Л., Верховцев Ф.В., Самойленко Н.В.</i> Обзор технологий разворачиваемых надувных конструкций и их отверждаемого композитного армирования	372
<i>Гусарова С.В., Зубарев Н.А., Галиновский А.Л., Филимонов А.С.</i> К вопросу оценки качества деталей, изготовленных методом 3D-печати	380
<i>Каткова Е.Д., Виноградова И.К.</i> Применение термопластичных материалов в конструкции сосудов высокого давления для ракетно-космической техники	390
<i>Михель Л.Е.</i> Анализ формы аэродинамических решетчатых рулей и возможные технологии изготовления	395
<i>Патич А.</i> Ультразвуковая технология наномодификации композиционных материалов: перспективы применения	399
<i>Савчишкина Ю.А., Янко М.А.</i> Методы испытания стыковочных систем космических аппаратов	403

Научное издание

**Инновационные технологии,
оборудование и материалы
машиностроительных производств
(МашТех-2025)**

**II Международная
научно-техническая конференция
(Москва, 26–28 ноября 2025 года)**

Сборник материалов

Том 2

*Художник Э.Ш. Мурадова
Компьютерная верстка С.А. Серебряковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 17.10.2025. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 33,64. Тираж 70 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
<https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.