

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P.39-48.

Научная статья
УДК 621.757
doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Научноёмкие технологии в сборочном производстве

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.
Нгуен Ван Линь², аспирант

^{1,2}Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-9478>

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4754-1632>

Аннотация. Сборка является важным этапом производства, оказывающим значительное влияние на качество изготовленных изделий. В связи с усложнением конструкций, повышением требований к качеству и повышением технико-экономических характеристик выпускаемых изделий, а также с постоянным научно-техническим прогрессом в машиностроении, задача гарантирования качества и достижения максимальной идентичности изделий становится все более актуальной. Успешность реализации проектов автоматизации сборочного производства связана с необходимостью параллельности геометрического и технологического проектирования. В статье излагается подход к решению данной проблемы на основе последовательного технологического совершенствования изделия с позиций сборки. В настоящее время проблема качества сборки является ключевой в машиностроении. В статье рассмотрены взаимосвязь сборки со всеми предшествующими этапами производства. Был произведен анализ проблем, связанных с сборочным производством в данной области. Уровень автоматизации сборки в России в области машиностроения не превышает 10%. Повышение уровня автоматизации сборки может быть достигнуто только на основе создания и исследования новых методов автоматической и роботизированной сборки. В статье излагаются возможности образцов экспериментального сборочного оборудования, созданного и исследованного в университетах России. Особой проблемой является отсутствие в России централизованного производителя автоматического сборочного оборудования. В статье обращается внимание на необходимость перехода к созданию и внедрению интеллектуального сборочного оборудования и технологий. В результате этого анализа выявлены вопросы, решение которых может быть реализовано на отраслевом и государственном уровнях.

Ключевые слова: сборочное производство, точность сборки, технологии сборки, эффективность производства, оборудование на агрегатно-модульной основе, технологичность изделий, системы CAD/CAM/CAPP, САПР

Для цитирования: Вартанов М.В., Линь Н.В. Научноёмкие технологии в сборочном производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

High-tech technologies in assembly production

Mikhail V. Vartanov¹, D.Eng.
Nguyen V. Lin², PhD student

^{1,2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com

Abstract. *Assembly is an important stage of production that has a substantial impact on the quality of manufactured products. Due to the complexity of structures, severization of quality requirements and increased technical and economic characteristics of manufactured products, taking into account constant scientific and technological progress in machine building, the task of quality assurance and achieving the maximum identity of products is becoming more and more relevant. The success of assembly automation projects implementation is associated with the need for geometric and technological design concurrency. The success of the implementation of assembly automation projects is associated with the need for both geometric and technological design concurrency. The article describes an approach to solving this problem considering the consistent technological improvement of the product through assembly prism. Currently, the problem of assembly quality is a key one in mechanical engineering field. The article discusses the intercoordination of the assembly with all the stages of production, going before. An analysis of the problems associated with assembly production in this area was carried out. The level of assembly automation in Russia in the field of mechanical engineering does not exceed 10 %. An increase in the level of assembly automation can be achieved only through the creation and research of new methods of automatic and robotic assembly. The article describes the technological capabilities and applications of new methods of automatic assembly. The possibilities of samples of experimental assembly equipment, created and studied at the universities of Russia, are studied. A particular problem is the lack of a single source manufacturer of automatic assembly equipment in Russia. The article draws attention to the need of the creation and implementation of intelligent assembly equipment and technologies. As a result of this analysis, issues have been identified, the solution of them can be made at the sector-specific and state levels.*

Keywords: assembly production, assembling accuracy, assembly technology, production efficiency, building-block concept equipment, manufacturability of products, CAD/CAM/CAPP systems, CAD

For citation: Vartanov M.V., Lin N.V. High-tech technologies in assembly production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Введение

Сборка тесно связана со всеми предыдущими этапами производства, и качество сборки непосредственно зависит от качества этих этапов. Одной из причин проблем с качеством сборки является то, что часто на этом этапе работают сотрудники с низкой квалификацией, у которых отсутствуют необходимые контрольно-измерительные инструменты. В результате этого возникают дефекты, которые могут привести к низкой надежности и большому проценту отказов машин и приборов.

Проблемы сборочного производства, перечисленные [1], уже довольно известны. Проблемы автоматизации сборки включают недостаточный уровень развития теории и технологии, неэффективность конструкций, множество видов соединений и условий сборки, требование точного взаимного ориентирования деталей, а также наличие размерных, кинематических и динамических связей в машинах. В России отсутствует централизованный производитель модульного сборочного оборудования. Оборудование, как правило, создается под функционал неавтоматизированного производства. Кроме того, конструкторская и технологическая подготовка не всегда взаимосвязаны, что может приводить к потере информации, а также несовершенству нормативных документов, регулирующих качество сборки.

Совершенствование сборки ведется по следующим направлениям [2]:

- обеспечение технологичности конструкций изделий;
- обеспечение параллельности конструкторско-технологического проектирования на основе методов CAD/CAM/CAE;
- модульный принцип конструирования изделий;
- создание и освоение в производстве новых методов сборки;
- обеспечение стабильного качества сборки на основе автоматизации и роботизации сборочных процессов;
- разработка адаптивного сборочного оборудования, обеспечивающего широкие возможности переналадки;
- технологическое проектирование сборки на основе принципов технологической ответственности.

Для создания эффективного технологического оборудования важно использовать подход, основанный на агрегатно-модульной конструкции с использованием нормализованных узлов, называемых технологическими модулями. Этот подход позволяет создавать многократно используемые модули для различных целей, что ускоряет процесс разработки и снижает издержки. Многие производители в мире используют подобный подход, среди которых фирмы Bosch, Renault, Sormel, Hitachi, Citizen Watch, Sortimat и НПО «Автопром-сборка». Существуют также специализированные научно-технические журналы, посвященные

сборке машин и приборов, которые издаются в России, Польше, Великобритании и США.

Для мелко- и среднесерийного производства эффективность сборочного процесса повышается благодаря использованию гибких сборочных систем, основанных на переналаживаемом технологическом оборудовании. Гибкость остается важным аспектом и при массовом производстве. Тем не менее, автоматизация и роботизация сборочного производства представляют собой особую проблему, которая требует особого внимания.

В условиях мелко- и среднесерийного производства достижение высокой эффективности сборочного производства связано с использованием гибких сборочных систем на базе переналаживаемого технологического оборудования. Важность гибкости подчеркивается также и в условиях массового производства. Следует отметить, что автоматизация и роботизация сборочного производства представляют особую сложность.

Анализ технологических требований к изделию и выявление сборочных задач

При разработке технологии сборки необходимо провести анализ первичных данных, включающих конструкторскую документацию, программу выпуска, продолжительность выпуска изделия, имеющиеся производственные ресурсы, каталоги необходимого сборочного оборудования и оснастки, а также информацию о предыдущих технологических процессах и рекомендации по технологическим режимам и инструкции.

Основными технологическими задачами, которые должны учитываться и обеспечиваться технологическим процессом являются [3]: точность пространственного положения деталей в собранном изделии; точность кинематики в изделии; обеспечение герметичности изделий и соединений; температурные условия эксплуатации; точность фиксации деталей; обеспечение требуемого дисбаланса в изделии; точность момента затяжки.

В настоящее время проблемы методологии связаны с нарушением принципов передачи достоверной информации при технической подготовке производства. Одной из таких проблем, на которую обращает внимание компания ADEM [4], является отсутствие стандарта на формат 3D-модели, содержащей конструкторские данные, такие как геометрия детали, пространственные отклонения, шероховатость и т. д.

Технологичность конструкций изделий при сборке

Для обеспечения технологичности изделий необходимо установить связь между конструкцией и технологией. Однако до настоящего времени это является менее формализованной задачей технической подготовки производства, решаемой эвристическим подходом и зависящей от квалификации специалистов. Подобное положение значительно осложняет возможности автоматизации сборки изделий. После завершения конструкторской подготовки производства внесение принципиальных изменений в конструкцию изделия становится невозможным. Это связано с возрастанием сроков подготовки производства и необходимостью проведения дополнительных экспериментов. Доступные САПР не решают эту проблему. Только интеграция CAD\CAM\CAPP-систем может решить данную проблему. Известно решение на основе объединения Solid Work и программного обеспечения DFMA от компании «Boothroyd and Dewhurst Inc.» (США) (рис. 1).

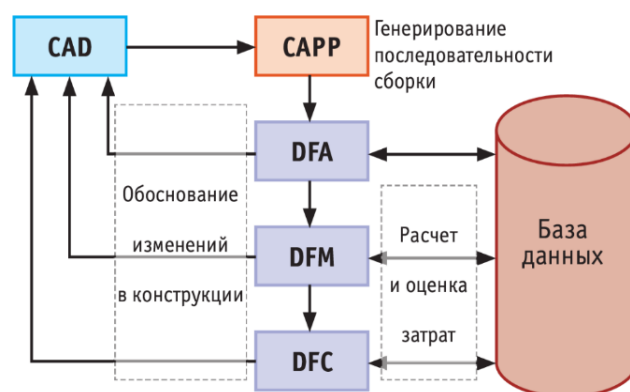


Рис. 1. Концепция САПР на основе метода DFMA

Fig. 1. CAD concept based on the DFM method

В работе [6] описан метод подготовки сборочного производства на основе параллельного конструкторско-технологического проектирования. Основная цель данного подхода – избежать необходимости переработки изделия, сократить время подготовки производства и уменьшить затраты. Однако для этого необходимо применять соответствующие методы и процедуры. Существует два возможных подхода для решения данной проблемы: использование технологических усовершенствований на прототипе или формирование множества технических решений и их последующая оптимизация (рис. 2).

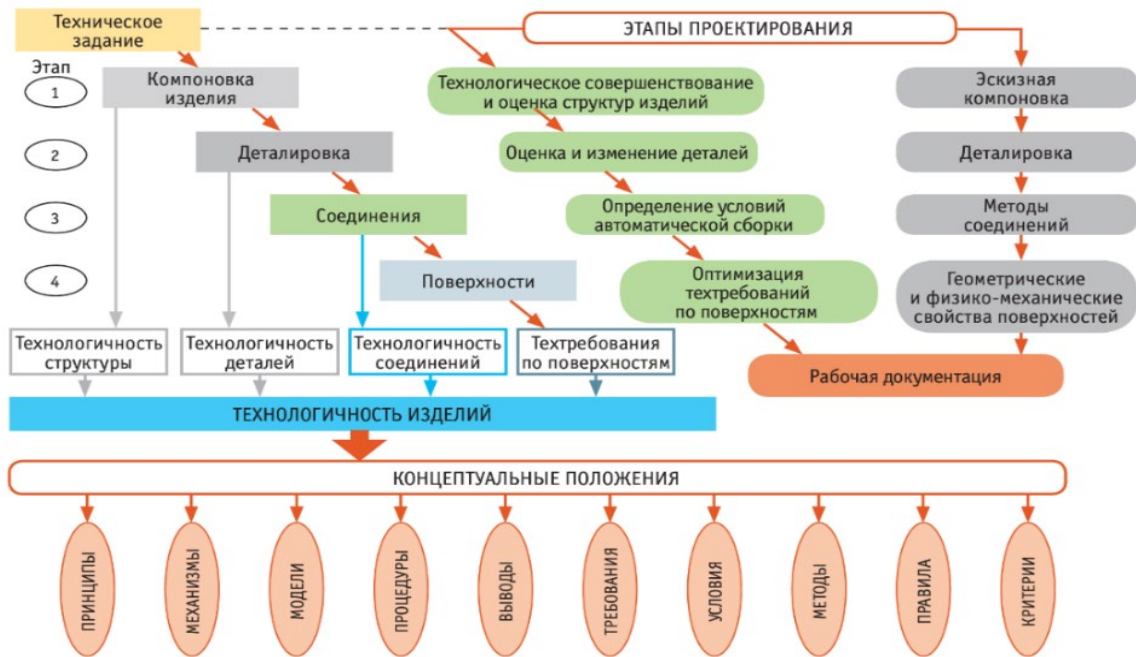


Рис. 2. Методология параллельного конструкторско-технологического проектирования

Fig. 2. Methodology of parallel process design engineering

Технологическое обеспечение качества сборки

В настоящее время существует два основных типа методов обеспечения качества сборки – пассивные и активные (рис. 3).

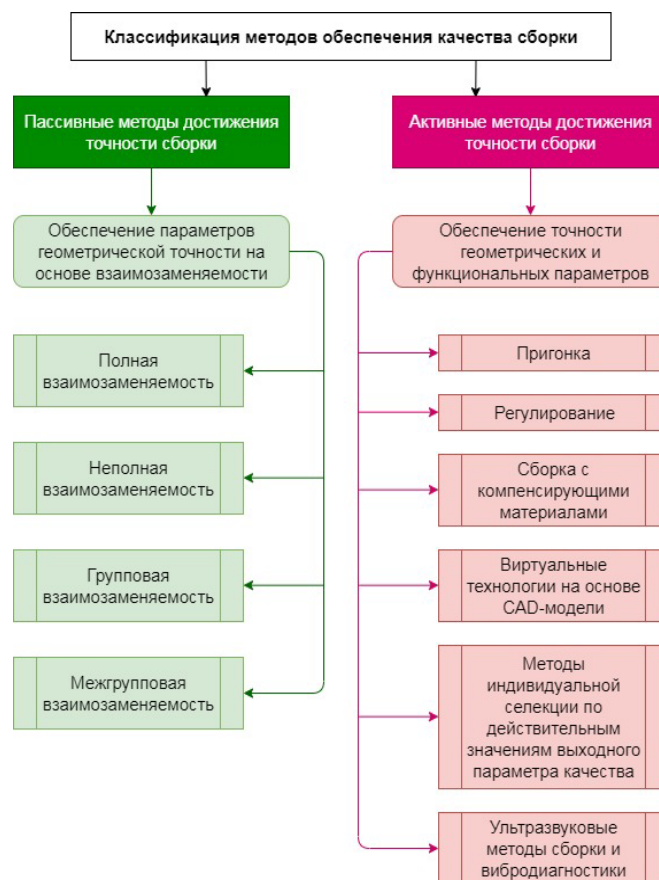


Рис. 3. Классификация методов обеспечения точности

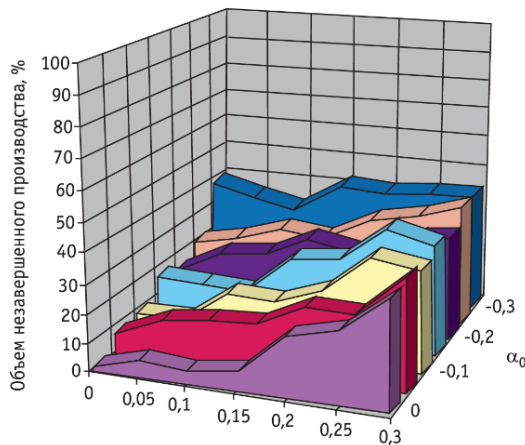
Fig. 3. Classification of methods for ensuring accuracy

Выбор конкретного метода зависит от соотношения между конструкторским и технологическим допусками, а также от экономических факторов. Современные методы обеспечения точности сборки учитывают асимметричное распределение размеров сопрягаемых деталей.

Использование классической селективной сборки в случае асимметричного распределения размеров может привести к большому объему незавершенного производства, что является проблемой (рис. 4). Для снижения объема незавершенного производства успешно применяется метод межгрупповой взаимозаменяемости (рис. 5) [7, 8]. Современное производство горного оборудования успешно использует данный метод.

Группа методов, направленных на формирование точности изделия, называется «активными». Они основаны на применении активных метрик и включают в себя такие методы, как пригонка, регулирование, использование компенсирующих материалов, применение виртуальных моделей, индивидуальная селекция и ультразвуковые методы контроля качества.

В некоторых случаях при производстве авиационных двигателей или автомобилей представительского класса применяют методы пригонки деталей, что увеличивает трудоемкость сборки и может привести к неоднократным переборкам изделий.



Параметр	Значение
Допуск, $IT_A=IT_B$, мкм	150
Максимальный зазор, S_{max} , мкм	150
Минимальный зазор, S_{min} , мкм	50
Групповые допуски, $a=b=ITB/2$, мкм	50
Количество групп, $n_1=n_2$	3
Нижнее предельное отклонение размера вала (поршня), мкм	-75
Закон распределения размеров вала (поршня)	Нормальный
Закон распределения размеров отверстия (цилиндра)	Нормальный
Объем производства, шт.	200

Рис. 4. Определение некомплектных деталей при достижении точности методом групповой взаимозаменяемости

Fig. 4. Determination of incomplete parts when achieving accuracy by the method of group interchangeability

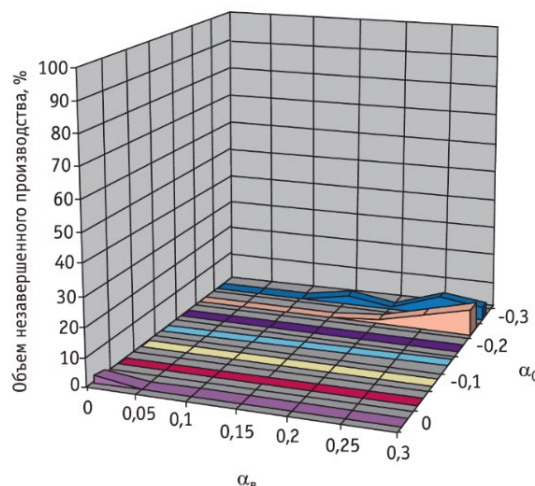


Рис. 5. Определение некомплектных деталей при достижении точности методом межгрупповой взаимозаменяемости

Fig. 5. Characterization of incomplete parts for achieving accuracy by intergroup interchangeability method

Метод функциональной взаимозаменяемости является альтернативой применения метода пригонки [9]. Качество сборки оценивается не на основе размерного анализа изделия, а на основе обеспечения функционального параметра. Варьирование взаимного углового положения деталей позволяет добиться требуемых выходных параметров. Все шире при технологической подготовке производства применяется виртуальная сборка на основе САД-моделей. Метод наиболее эффективен при сборке деталей сложного профиля.

В промышленной практике актуальны методы сборки, использующие компенсаторы, включая сборку с компенсирующими материалами (например, пластмассами и легкоплавкими металлами). Одним из новых методов, получивших название «injected metal», является заливка легкоплавким металлом из искусственно созданного большого зазора в цилиндрическом соединении.

Для серийного производства может быть эффективен метод индивидуального подбора деталей. В России были разработаны соответствующие теоретические и информационные ресурсы для его реализации в машиностроении.

При производстве изделий выбор метода сопряжения является важным фактором. В настоящее время разработаны новые методы, которые позволяют контролировать прочность прессовых соединений на основе заданных параметров качества при механической обработке сопрягаемых поверхностей [10]. Кроме того, для улучшения качества прессовых соединений и их нагрузочной способности можно использовать ультразвук [11]. Применение ультразвуковых колебаний позволяет повысить качество соединений благодаря эффекту УЗ-сварки.

Если условия собираемости, основанные на размерном анализе позиций, не выполнены, то применяют адаптивную сборку. Технические решения на основе адаптивной сборки описаны в технической литературе и могут быть реализованы с использованием пассивной или активной адаптаций [12]. Методы активной адаптации находятся на стадии исследований. В Ковровской государственной технологической академии давно и успешно занимаются исследованием и разработкой

устройств пассивной адаптации для резьбовых соединений [13] (рис. 7). В основе метода заложена последовательная работа двух кинематических цепей устройства.

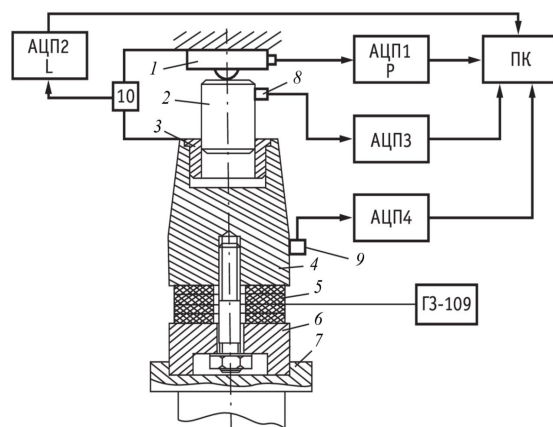


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования процессов при виброзапрессовке:

1 – датчик силоизмерительный резистивного типа; 2, 3 – соединяемые детали (вал и втулка соответственно); 4 – концентратор колебательной энергии; 5 – пьезокерамический вибровозбудитель; 6 – противовес; 7 – шток гидроцилиндра; 8, 9 – датчики вибрации типа КВ-10; ГЗ-109 – генератор звуковой; 10 – датчик перемещения резистивного типа; АЦП1...АЦП4 – аналого-цифровой преобразователь (ЛА2USB); P – усилие запрессовки; L – перемещение; ПК – персональный компьютер

Fig. 6. Scheme of a test installation for the study of processes during vibration pressing:

1 – force measuring sensor of resistive type; 2, 3 – interconnected parts (shaft and sleeve, respectively); 4 – vibrational energy concentrator; 5 – piezoceramic vibration exciter; 6 – counterweight; 7 – hydraulic cylinder rod; 8, 9 – vibration sensors of KV-10 type; GZ-109 – sound generator (SG); 10 – resistive type displacement sensor; ADC1...ADC4 – analog-to-digital converter (LA2USB); P – pressing force; L – displacement; PC – personal computer

Компания AtlasCorpo (США) предлагает инновационные решения для сборочных систем, включая интеллектуальные гайковерты. Эти решения могут быть как ручными, так и автоматическими. Использование виртуальных станций позволяет контролировать инструмент, обмениваться данными и проверять аксессуары. За счет применения интеллектуального модуля, можно хранить информацию обо всех выполненных операциях и легко настраивать электрические гайковерты.

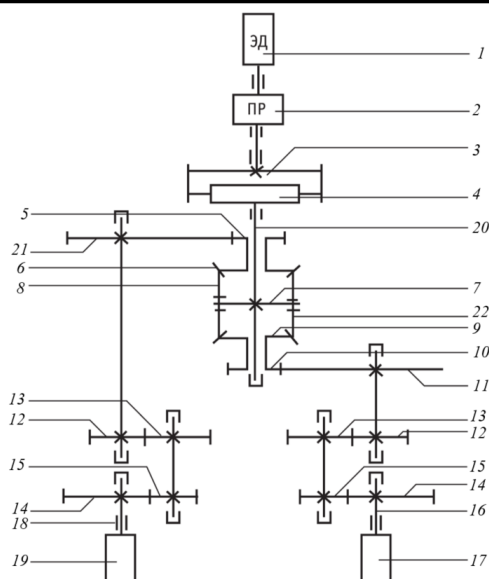


Рис. 7. Структурная схема адаптивного резьбовзавинчивающего устройства:

1 – электродвигатель; 2 – планетарный редуктор; 3, 4 – полумуфта; 5, 6, 9, 10 – двоянные шестерня; 7 – ось сателлита; 8, 22 – сателлит; 11, 21 – колесо; 12, 13, 14, 15 – зубчатые передачи; 16, 18 – шпиндель; 17, 19 – патрон; 20 – ось дифференциала

Fig. 7. Block diagram of adaptive threading device:

1 – electric motor; 2 – planetary reduction gear uni; 3, 4 – half couplings; 5, 6, 9, 10 – twin gear members; 7 – planet axis; 8, 22 – planet; 11, 21 – wheel; 12, 13, 14, 15 – gears; 16, 18 – spindle; 17, 19 – workholder; 20 – differential axis

Для проектирования автоматической сборочной операции необходимо выполнить ряд дополнительных шагов. Основные этапы автоматической сборки включают в себя проверку технологичности изделия для автоматизированной сборки, выбор способа и устройств для автоматической загрузки деталей, разработку технических решений для автоматического ориентирования деталей, проверку условий собираемости в автоматическом режиме, а также выбор методов и технических средств для автоматического контроля в процессе выполнения автоматической сборки.

Проблема автоматизации сборки широко освещена в специальной технической литературе [14]. Решение этой задачи достаточно сложно и требует определенного опыта, особенно учитывая ограниченность стандартного оборудования для автоматической сборки на рынке. В России отсутствует централизованный производитель сборочного оборудования, и заказчикам приходится проектировать

нестандартное технологическое оборудование. Тем не менее, за последние годы были известны успешные примеры автоматизации сборочных процессов малыми научно-производственными компаниями.

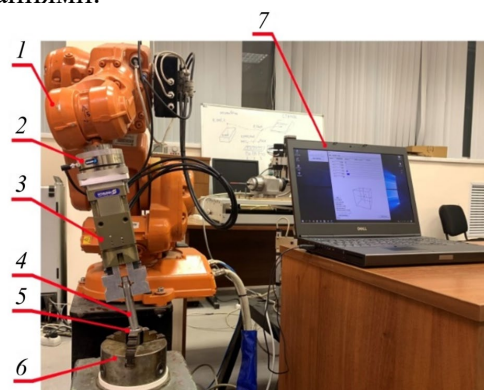


Рис. 8. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки:

1 – робот ABB IRB 140; 2 – силомоментный датчик; 3 – схват; 4 – вал; 5 – втулка; 6 – базовое приспособление; 7 – персональный компьютер

Fig. 8. Test installation for the study of robotic assembly:

1 – robot ABB IRB 140; 2 – force-torque sensor; 3 – grip; 4 – shaft; 5 – sleeve; 6 – basic device; 7 – personal computer

Одной из серьезных проблем автоматической сборки является необходимость обеспечения точности соединений, которая постоянно возрастает. При роботизированной сборке деталей возможны осевые или угловые погрешности положения из-за неточности движений робота-манипулятора, недостаточной повторяемости и геометрических погрешностей деталей. Для корректировки их используется точное движение, которое называется адаптацией движения, и может быть выполнено путем активной или пассивной адаптации, или их комбинации. При сборке с высокой точностью и малыми зазорами наиболее эффективна активная адаптация, основанная на управлении с обратной связью с помощью силомоментных датчиков или технического зрения. Однако теоретические основы роботизированной сборки с активной адаптацией пока недостаточно разработаны. В работе [15] представлено исследование, удостоверяющее технологическую надежность процесса сборки на основе обратной связи и алгоритмов корректировки программных траекторий для соединений «вал – втулка» (рис. 8).

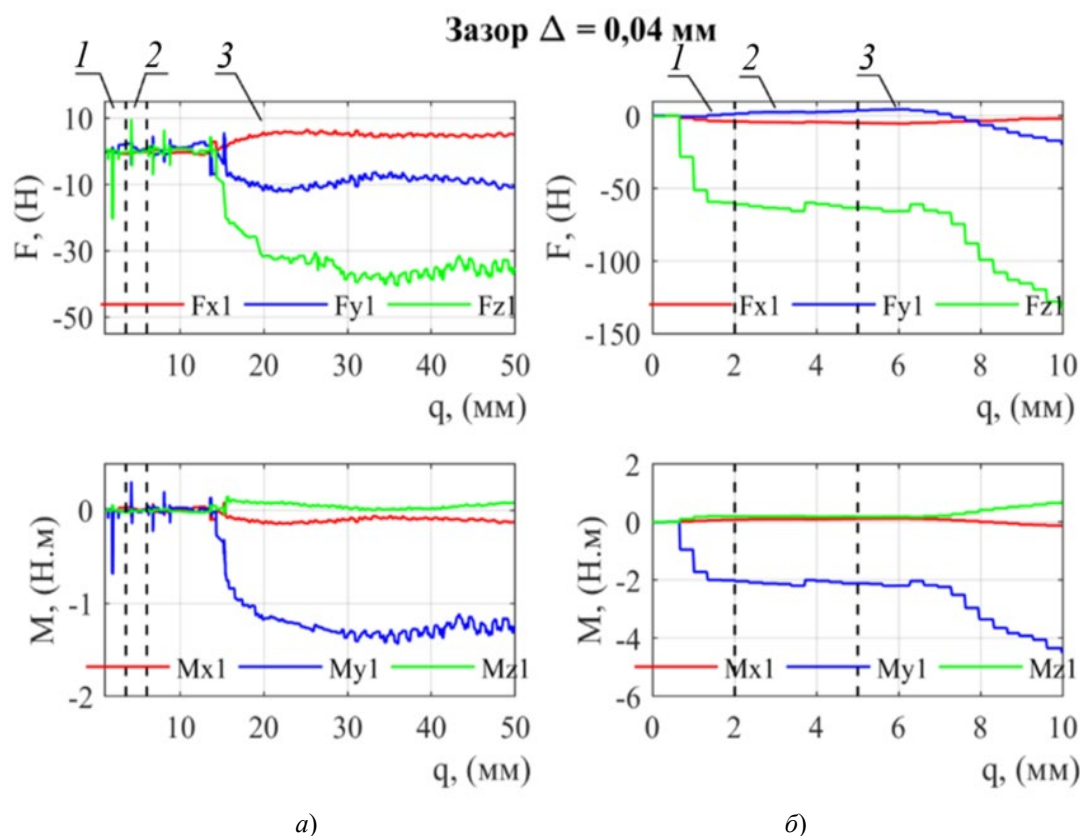


Рис. 9. Зависимость изменения векторов сил и моментов на трех этапах сопряжения:

a – с применением алгоритма управления; *б* – при отсутствии алгоритма управления;

1 – область одноточечного контакта; *2* – область трехточечного контакта; *3* – область двухточечного контакта

Fig. 9. Dependence of changes in vectors of forces and moments at three stages of integration:

a – using a control algorithm; *b* – a control algorithm absent;

1 – the area of single-point contact; *2* – the area of three-point contact; *3* – the area of two-point contact

Были разработаны математические модели контактных состояний для роботизированной сборки цилиндрических соединений. Использование идентификатора положения деталей позволяет установить их положение на основе контактных реакций в зоне соединения. Была доказана высокая эффективность модели Гауссовой смеси распределения на основе ожидания максимизации для идентификации контактных состояний деталей в процессе роботизированной сборки. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что алгоритм позиционно-силового управления при роботизированной сборке позволяет сократить величину сборочной силы с 120 до 40 Н для соединений с зазором 0,4 мм, а также увеличить глубину сопряжения с 10 до 50 мм [15] (рис. 9).

В России осуществляется процесс разработки специализированного технологического оборудования и автоматизированных линий для оборонной промышленности, в том числе для

производства патронов. На текущий момент исследования и работы по разработке новых образцов технологического оборудования проводятся в ряде высших учебных заведениях РФ.

Заключение

В ближайшей перспективе ожидается значительная трансформация сборочного производства. Одним из первоочередных шагов должна стать автоматизация отдельных позиций. Следующим этапом станет автоматизация технологических систем. С учетом сложившейся многономенклатурности современного производства стоит задача переноса решений, оправдавших себя в массовом и крупносерийном производстве. Хорошие перспективы применения имеет адаптивная сборочная оснастка.

Поскольку четвертая промышленная революция в первую очередь означает автоматизацию производства, изделия должны быть спроектированы с учетом технологичности автоматической

сборки. Для решения вызванных данной революцией проблем необходимо использовать модульное автоматическое сборочное оборудование. Расширение сферы применения аддитивных технологий также приведет к существенным трансформациям в производстве сборки. Это связано с тем, что аддитивные технологии не требуют ограничений для проектирования изделий в соответствии с методами их производства. Например, в перспективе возможно исключить разбиение корпуса агрегатов на несколько составных частей благодаря использованию аддитивных технологий, что приведет к значительному уменьшению объема сборочных работ.

Сборочное производство играет ключевую роль в обеспечении качества промышленной продукции. От того как правильно выбраны и реализованы технологические решения зависит успешность изделий на рынке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2-х томах. Том 2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд., перераб. и доп. М., Инновационное машиностроение, 2018. 818 с. ISBN: 978-5-6040281-7-9
2. **Безъязычный В.Ф., Семенов А.Н.** Научные и методические основы сборки. Состояние теории // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. №4. С. 3–7.
3. **Холодкова А.Г., Кристал М.Г., Штриков Б.Л. и др.** Технология автоматической сборки. М., Машиностроение, 2010. 560 с. ISBN: 978-5-217-03412-3
4. **Зинченко Д.** Особенности и преимущества системы ADEM области создания управляющих программ для станков с ЧПУ // «Станкоинструмент». 2019. №1 (014). С. 72–80. DOI: 10.22184/2499-9407.2019.14.01.72.80
5. **Попов А.М.** Повышение сборочной технологичности конструкций изделий в интегрированных системах автоматизированного проектирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. №1. С. 14–19. EDN: PGPJJP
6. **Варганов М.В.** Методологическое обеспечение технологичности конструкций изделий машиностроения в процессе проектирования // Автоматизация и современные технологии. 2016. С. 33–36.
7. **Набатников Ю.Ф.** Метод селективной сборки в условиях мелкосерийного производства // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. №9. С. 19–32. EDN: PYRMJH
8. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Анализ собираемости изделий типа «вал-втулка» // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. №1. С. 23–26. EDN: PGPJKJ
9. **Семенов А.Н., Сазанов А.А.** Особенности обеспечения функционального качества авиационной топливной форсунки на этапе сборки // 2-й международный научно-технический семинар «Современные технологии сборки», М., МГТУ «МАМИ». 2011. С. 65–71.
10. **Безъязычный В.Ф., Федулов В.М.** К вопросу

технологического обеспечения качества соединений деталей при сборке с гарантированных натягом // «Сборка в машиностроении, приборостроении». 2012. № 6. С. 33–41.

11. **Шуваев В.Г.** Обеспечение качества прессовых соединений методами вибрационной диагностики при ультразвуковой сборке // МНТС «Современные технологии сборки», Москва, МГТУ «МАМИ». 2013. С. 126–131.

12. **Кузнецова С.В., Симаков А.Л., Варганов М.В., Зинина И.Н.** Синтез управления процессом адаптации детали при сборке методом обратной задачи динамики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. №3. С. 104–111. EDN: UGUHCZ

13. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Обоснование универсальной кинематической схемы многошпиндельных гайковертов с произвольным числом шпинделей на основе структурных схем управления процессом сборки // Современные технологии сборки: матер. VI междунар. науч.-техн. семинара; под ред. М.В. Варганова. М.: Московский Политех. 2019. С. 40–45. EDN: EEPMLE

14. **Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Том III-5 // А.А. Гусев, В.В. Павлов; под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 2001. 640 с. ISBN: 5-217-01959-X

15. **Нгуен Ван Зунг.** Повышение технологической надежности роботизированной сборки на основе разработки алгоритма управления роботом // Известия ТулГУ. 2022. № 4. С. 518–528.

REFERENCES

1. Handbook of a machine-building technologist. In 2 volumes. Volume 2 / Edited by A.S. Vasiliev, A.A. Kutin. 6th ed., updated and revised. Moscow, Innovative Mechanical Engineering, 2018, 818 p. ISBN: 978-5-6040281-7-9
2. Bez'yazichny V.F., Semenov A.N. Scientific and methodological foundations of assembly. The state of theory // Assembly in mechanical engineering, instrumentation, 2004, No.4, pp. 3–7.
3. Kholodkova A.G., Kristal M.G., Shtrikov B.L. et al. Technology of automatic assembly. M., Mechanical Engineering, 2010, 560 p. ISBN: 978-5-217-03412-3
4. Zinchenko D. Features and advantages of the ADEM system in the field of creating control programs for CNC machines // «Stankoinstrument», 2019, No.1 (014). pp. 72–80. DOI: 10.22184/2499-9407.2019.14.01.72.80
5. Popov A.M. Improving the assembly manufacturability of product designs in integrated computer-aided design systems // Assembly in mechanical engineering, instrumentation, 2012, No. 1, pp. 14–19. EDN: PGPJJP
6. Vartanov M.V. Methodological support of the manufacturability of mechanical engineering product designs in the design process // Automatization and modern technologies, 2016, pp. 33–36.
7. Nabatnikov Yu.F. Method of selective assembly in conditions of small-scale production // Assembly in mechanical engineering, Instrumentation. 2012, No. 9, pp. 19–32. EDN: PYRMJH
8. Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Analysis of the assemblability of products of the «shaft-sleeve» type //

Assembly in mechanical engineering, instrumentation. 2012. No.1. pp.23–26. EDN: PGPJKJ

9. Semenov A.N., Sazanov A.A. The importance of ensuring the functional quality of an aviation fuel injector at the assembly stage // Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Seminar «Modern assembly technologies», Moscow, MSTU "MAMI", 2011. pp. 65–71

10. Bezlyazichniy V.F., Fedulov V.M. On the issue of technological assurance of the quality of connections of components during assembly with guaranteed tightness // «Assembly in mechanical engineering, instrumentation 2, 2012, No. 6, pp. 33–41.

11. Shuvaev V.G. Quality assurance of press joints by vibration diagnostics methods during ultrasonic assembly // MNTS «Modern assembly technologies», Moscow, MSTU «MAMI», 2013, pp. 126–131.

12. Kuznetsova S.V., Simakov A.L., Vartanov M.V., Zinina I.N. Synthesis of control over the adaptation process of a part during assembly by the method of the inverse

dynamics problem // Problems of mechanical engineering and automation, 2019, No.3, pp. 104–111. EDN: UGUHCZ

13. Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu. Substantiation of the universal kinematic scheme of multi-spindle wrenches with an arbitrary number of spindles based on structural control schemes of the assembly process // Modern assembly technologies: proceedings of the VI-th International Scientific and Technical seminar; edited by M.V. Vartanov. Moscow: Moscow Polytech. 2019, pp. 40–45. EDN: EEPMLE

14. Mechanical engineering. Encyclopedia / Ed. council: K.V. Frolov (chief) et al. Moscow: Mashinostroenie. Assembly technology in mechanical engineering, volume III-5 // A.A. Gusev, V.V. Pavlov; edited by Yu.M. Solomentseva. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 640 p. ISBN: 5-217-01959-X

15. Nguyen Van Zung. Improving the technological reliability of a robotic assembly based on the development of a robot control algorithm // Bulletin of TulSU, 2022, No. 4, pp. 518–528.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; одобрена после рецензирования 07.07.2023; принята к публикации 17.08.2023.

The article was submitted 20.06.2023; approved after reviewing 06.06.2023; assepted for publication 17.08.2023.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.10.2023. Выход в свет 30.10.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035,
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+