

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 31-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 31-38.

Научная статья
УДК 621.865.8
doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-31-38

Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.

Александр Игоревич Шварц², аспирант

Дмитрий Николаевич Миронов³, инженер-проектировщик

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

³ ООО «ЛАБ 316», Москва, Россия

¹ natalia.vartanova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-9478>

² alex.schwarz101@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2934-9685>

³ diman.mironov2010@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7872-5018>

Аннотация. Промышленные роботы применяются при механической обработке в машиностроении. Данная тенденция связана с увеличением геометрической сложности деталей и более широкими кинематическими возможностями промышленных роботов в сравнении с классическими станками с ЧПУ. В статье анализируются технологические возможности применения промышленных роботов на операциях отделочной механической обработки, приводятся причины, сдерживающие внедрение роботов. Приводятся схемы построения технологических операций: «деталь в руке» и «инструмент в руке». Анализируются факторы, влияющие на выбор предпочтительной схемы обработки. Рассматриваются доступные средства пассивной и активной адаптации, применяемые при роботизированной обработке. Приводятся области эффективного применения средств пассивной и активной адаптации. В статье приводятся две основные причины возникновения вибраций при роботизированной обработке: низкая жесткость конструкции промышленного робота и влияние погрешностей формы с предшествующей операции. Обсуждается проблема разработки контроллера устойчивого управления по величине съема материала. Постановка задачи обусловлена тем, что модель процесса резания варьируется в значительной степени в зависимости от условий резания. Силовой контроль робота дает возможность учитывать жесткость робота без ущерба для точности перемещений по шести координатам. В статье рассматривается применение нейронной сети и генетического алгоритма при разработке операции роботизированного полирования плоской поверхности в условиях ограниченного доступа. Авторами статьи разработан постпроцессор управления промышленным роботом в условиях переменного вылета инструмента и неравномерного припуска. С этой целью спроектирована и изготовлена специальная технологическая оснастка. В лаборатории «Промышленные роботы и средства автоматизации» проведены эксперименты по апробации разработанного алгоритмического и программного обеспечения.

Ключевые слова: промышленный робот, роботизированная обработка, адаптивность, качество поверхности, позиционно-силовое управление.

Для цитирования: Вартанов М.В., Шварц А.И., Миронов Д.Н. Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 31–38. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-31-38

Technological quality assurance in robotic finish based on adaptation tools

Mikhail V. Vartanov¹, D. Eng.

Alexander I. Schwartz², PhD student

Dmitry N. Mironov³, design engineer

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

³ LAB 316 LLC, Moscow, Russia

¹ natalia.vartanova@bk.ru

² alex.schwarz101@gmail.com

³ diman.mironov2010@gmail.com

Abstract. Industrial robots are used for machining in mechanical engineering. This trend is associated with an increase in the geometric complexity of parts and wider kinematic capabilities of industrial robots in comparison with classical CNC machines. The article analyzes the technological capabilities of using industrial robots in finishing machining operations, and provides the reasons for limited robots introduction. Schemes of construction of technological operations are given: "part in hand" and "tool in hand". The factors influencing the choice of the preferred machining are studied. The areas of effective application of passive and active adaptation tools are given. The article provides two main reasons for possible vibrations under robotic manipulation: e.g. low rigidity of the industrial robot structure and shape errors effect in the previous operation. The problem of developing a sustainable code conversion for the amount of material removal is discussed. The problem statement is due to the fact that the model of the cutting process varies greatly depending on the cutting conditions. Force control work makes it possible to take into account the rigidity of the robot without sacrificing the running accuracy in six coordinates. The article discusses the use of a neural network and a genetic algorithm in the development of a robotic polishing operation for a flat surface within limited access constraints. The authors of the article have developed a postprocessor for controlling an industrial robot in case of variable tool overhang and uneven tolerance. Special technological equipment has been designed and manufactured for this purpose. Experiments on testing of the developed algorithmic and software have been conducted in the laboratory "Industrial Robots and Automation Tools".

Keywords: industrial robot, robotic manipulation, adaptability, surface quality, position-force control.

For citation: Vartanov M.V., Schwartz A.I., Mironov D.N. Technological quality assurance in robotic finish based on adaptation tools / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 31–38. doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-31-38

Введение

Растущие требования промышленности к снижению затрат при обеспечении качества обработки считаются повседневной задачей. Опасные, повторяющиеся и утомительные ручные операции, которые выполнялись вручную, роботы могут выполнять быстрее, безопаснее и качественнее. Тем не менее, очень мало роботов применяется на операциях по удалению материала. В прецизионном производстве по-прежнему в основном используются станки с числовым программным управлением (ЧПУ) из-за их высокого уровня точности и жесткости.

На протяжении ряда лет отмечаются следующие основные проблемы, сдерживающие широкое распространение механической обработки роботами [1 – 4]: недостаточная жесткость руки робота; сложность преобразований на пути от CAD-модели к движениям

робота; возникновение вибраций при обработке заготовки.

В последние годы наблюдается тенденция усложнения конфигурации деталей, создание сложных профилей и поверхностей, которые трудно поддаются обработке на классических станках с ЧПУ. Для работы со сложными деталями может потребоваться доступность, которую обеспечивает только шестиосевой робот.

Эволюция промышленных роботов, постоянно увеличивает их точность и повторяемость, благодаря чему, роботы все чаще приходят на замену станкам с ЧПУ. Однако роботы не всегда обеспечивают требуемую жесткость и в настоящее время не способны обеспечивать микронную точность обработки и точное позиционирование. Производители роботов знают об этой проблеме и на рынке появились специальные модели роботов, имеющие повышенную жесткость. Например, фирма АВВ предлагает модели IRB 6660 и 6700. Модель IRB 6660

даже позиционируется как робот для черновой обработки отливок. Для подобных задач компания FANUC предлагает робот модели M-900iB.280. Данная модель робота уже применяется в аэрокосмической промышленности для сверления и клепки.

Базовые конфигурации для финишной обработки

Существует две принципиальные схемы роботизированной обработки поверхностей: «деталь в руке» или «инструмент в руке». Как следует из названий, конфигурация «деталь в руке» – это вариант применения, при котором робот переносит обрабатываемую деталь к стационарному устройству для финишной обработки поверхности. Во втором варианте выходное звено робота снабжается инструментальным шпинделем с настроенным инструментом, и робот движется по заданной траектории относительно неподвижной детали.

Схема «деталь в руке» (рис. 1) чаще всего используются в случае, когда обрабатываемая деталь имеет относительно небольшой размер.

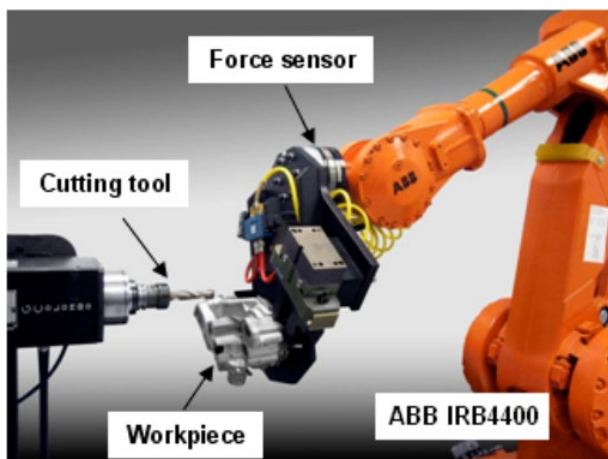


Рис. 1. Обработка с закреплением заготовки на роботе [5]

Fig. 1. Machining with the workpiece fixed on the robot [5]

Схват позволяет роботу брать деталь и манипулировать ею относительно устройства финишной обработки. Такие методы широко распространены в производстве из-за нескольких преимуществ их использования. Одно из преимуществ заключается в том, что операции робота часто можно совмещать с операцией

чистовой обработки поверхности на одной рабочей станции, т. е. робот может снять деталь с конвейера, обработать деталь, а затем поместить ее на окончательную упаковку или в промежуточные удерживающие матрицы для покраски и т. д.

Одним из недостатков схемы «деталь в руке» является то, что иногда невозможно обработать всю поверхность детали. Это может быть связано как с помехами схвату робота, так и с недостаточной ловкостью робота, чтобы захватить деталь со всех сторон. Часто единственным решением этой проблемы является размещение детали в промежуточном приспособлении и повторный захват детали в другом положении.

Конфигурация «инструмент в руке» (рис. 2) в настоящее время менее распространена в производстве, однако последние достижения в технологии активного управления усилием послужили расширению возможных случаев применения. Конфигурация «инструмент в руке» используется, когда обрабатываемая деталь громоздка для манипулирования роботом, а также в случаях, когда переустановка детали в схвате робота нежелательна. В этих случаях к роботу крепится инструмент, который по программной траектории проводит обработку. Управление инструментом может быть реализовано как на основе пассивного, так и активного управления.

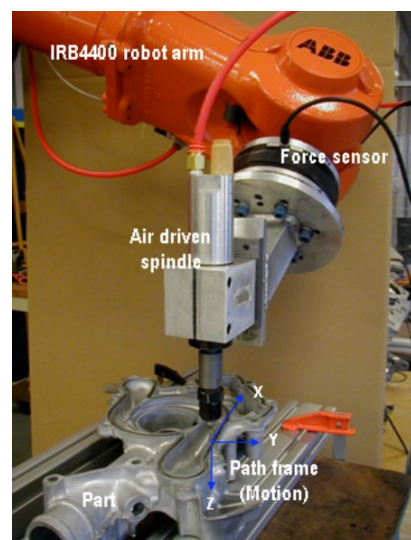


Рис. 2. Фрезерование с использованием пневмопривода с базированием заготовки на столе [5]

Fig. 2. Milling using a pneumatic actuator with the workpiece fixed on the table [5]

Менее дорогие пассивные адаптивные устройства (рис. 3) могут использоваться там, где нет необходимости в точном контроле силы. Поэтому они наиболее полезны для относительно плоских контуров или для грубых операций по удалению заусенцев или шлифованию. Особенность данного шпинделя заключается в том, что при помощи системы управления давлением воздуха возможно регулировать жесткость установленного в нем инструмента в осевом направлении.

С другой стороны, активные силовые устройства с замкнутым контуром управления идеально подходят для конфигураций «инструмент в руке».

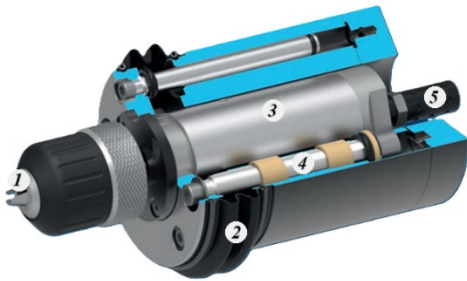


Рис. 3. Шпиндель с пассивной адаптацией Schunk MFT-F-0-0:

1 – держатель инструмента; 2 – пыльник; 3 – пневматический шпиндель; 4 – опорный вал; 5 – компенсатор

Fig. 3. Schunk MFT-F-0-0 passive adaptation spindle:

1 – tool holder; 2 – dust cover; 3 – pneumatic spindle; 4 – support shaft; 5 – compensator

Эти устройства постоянно компенсируют ускорение и гравитационные эффекты, поэтому они могут обеспечивать точные уровни силы в любом направлении. Активные устройства, хотя и более дорогие, но способны выполнять широкий спектр отделочных операций – от грубой шлифовки до тонкой полировки различных материалов. Поскольку эти устройства имеют специальный контроллер, они предоставляют уникальные расширенные функции, которые значительно упрощают программирование роботов.

Конфигурация «инструмент в руке», с использованием силового контроля позволяет достичь более высокого качества поверхности и точности позиционирования робота при обработке. Наличие активного контроля силы позволяет провести анализ обработки с точки зрения виброустойчивости процесса.

Методы подавления вибраций при роботизированной обработке

Основным препятствием к использованию промышленных роботов при механической обработке, является их склонность к механическим воздействиям, индуцированным вибрациями и их неспособность противостоять им. В ходе экспериментальных исследований в Московском Политехе установлено, что существуют постоянные отклонения по оси Z при обработке (рис. 4). Как видно из рисунка 4, при контакте с заготовкой, выходное звено начинает вибрировать. Это отрицательно влияет как на точность, так и на качество получаемой поверхности детали.

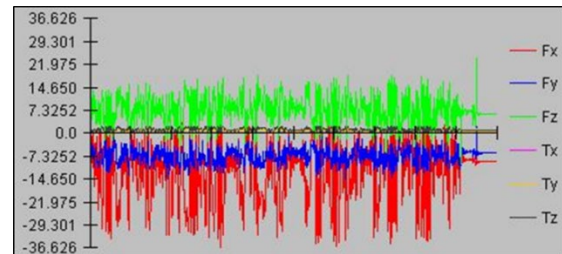


Рис. 4. Выводы с силомоментного датчика (скорость подачи 4 м/мин; число оборотов шпинделя – 1500 об/мин; глубина резания – 0.1 мм) [4]

Fig. 4. Conclusions from the power–torque sensor (feed speed 4 m/min; number of spindle revolutions – 1500 rpm; cutting depth - 0.1 mm) [4]

Для того чтобы подавить вибрации разработали активное выходное звено манипулятора (рис. 5) [2].

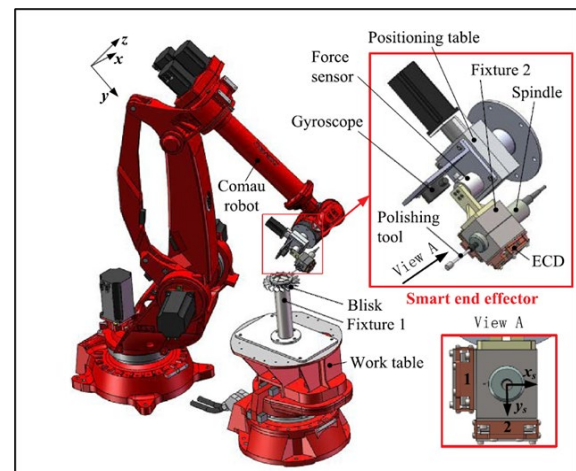


Рис. 5. Установка для финишной обработки лопаток ГТД с умным выходным звеном [2]

Fig. 5. Installation for blades finishing in a gas turbine engine with a smart output link [2]

В данной работе рассмотрено применение демпферов с постоянными магнитами и ПИД регуляторы собственной разработки. С помощью силового контроля получилось значительно уменьшить разброс контактных сил в зоне резания, и, как следствие, улучшить качество поверхности детали.

В то время, как для механической обработки на станках с ЧПУ тепловые погрешности – самый большой компонент, в роботизированной механической обработке наибольшую погрешность дают ошибки движения. Одним из основных недостатков использования робота в механической обработке, является недостаточная жесткость.

Например, сила резания в 500 Н при фрезеровании вызовет миллиметровую ошибку позиции для робота по сравнению с ошибкой меньше, чем 0,01 мм для станка с ЧПУ. Чтобы достигнуть более высокой размерной точности, должна быть компенсирована деформация от силы резания.

Главные ошибки в позиции робота при автоматизированном процессе механической обработки могут быть классифицированы на две категории: 1-я ошибка от силы резания и 2-я ошибка движения (кинематические и динамические ошибки).

Концепция контроля процесса по удельному съему материала должна динамично корректировать подачу, чтобы сохранить постоянную величину съема во время процесса механической обработки:

$$A_{уд} = \frac{F \cdot v}{V} = \text{const}, \quad (1)$$

где F – составляющая силы резания; v – величина подачи; V – объем удаляемого материала.

В свою очередь объем снимаемого материала прямо пропорционально связан с

подачей. Подача робота может корректироваться, чтобы поддерживать постоянную мощность резания, а, следовательно, и возникающие усилия.

Проблема разработки контроллера устойчивого управления по величине съема материала возникает из-за того, что модель процесса резания варьируется в значительной степени в зависимости от условий резания. Силовой контроль робота дает возможность учитывать жесткость робота без ущерба для точности перемещений по шести координатам.

Компенсация деформации в реальном времени базируется на основе модели структуры робота. Так как вызванная силой деформация – основной источник погрешности в автоматизированном процессе механической обработки, качество поверхности может быть улучшено за счет предложенного метода. Эта функция особенно важна при фрезеровании, где сила резания может превышать 1000 Н.

Регулирование сил при механической обработке дает значительные преимущества, повышая производительность работы и улучшая качество детали. Управление удельным съемом за счет силы резания реализуется при помощи корректировки в реальном времени подачи робота. Различные стратегии управления, включая ПИД-регулятор, адаптивное управление и использование нечеткой логики, может быть реализовано в зависимости от различных условий резания.

Наиболее эффективным в снижении погрешностей обработки представляется использование ПИД-контроллеров [12]. Смысл заключается в приложении обратной связи с перерегулированием. Решение проблемы заключается в том, что к закону управления добавляют третий терм, основанный на результатах интегрирования погрешности по времени:

$$at = K_p(Y(t) - X(t)) + K_I \int \partial(Y(t) - X(t))dt + K_D \frac{\partial(Y(t) - X(t))}{\partial t}, \quad (2)$$

где K_p , K_I , K_D – коэффициенты усиления по координате, интегральный и дифференциальный; at – управляющее воздействие.

Дифференциальный терм гасит колебания в системе, для управления которой он применяется. При этом производная такой

погрешности прикладывается в направлении, противоположном пропорциональному терму, что приводит к уменьшению общего отклика на возмущение. Однако, если та же погрешность продолжит свое присутствие и не изменится, то производная уменьшится до нуля и

при выборе управляющего воздействия будет доминировать пропорциональный терм.

Известен программный алгоритм [3] для предотвращения вибраций при обработке плоскостей. Было выявлено, что на возникновение и величину вибраций при обработке влияют следующие факторы: направление движения при обработке и угол выходного звена к обрабатываемой поверхности; положение звеньев робота, то есть конфигурация робота в момент обработки; расположение заготовки в рабочем пространстве робота; режимы резания.

Авторами было выбрано четыре произвольные конфигурации робота и углы наклона режущего инструмента к обрабатываемой поверхности. После проведения экспериментов были сделаны следующие выводы:

– вибрации можно избежать, изменив конфигурацию робота во время обработки. Есть определенные конфигурации роботов, более склонные к вибрации;

– вибрации можно избежать, используя другой угол между поверхностью резания и основанием робота. В большинстве случаев характер вибрации будет совершенно другим при повороте поверхности реза на $\pm 40^\circ$;

– если при встречном фрезеровании возникает вибрация, то при попутном, соответственно, её может и не быть. Силы резания, перпендикулярные поверхности заготовки, являются лучшим выбором;

– увеличение или уменьшение параметров резания, таких как DOC, WOC или скорость подачи, может изменить угол между силой резания и поверхностью заготовки;

– каждое положение при резании может привести к вибрации и каждое положение можно стабилизировать;

– выбрать правильный инструмент с точки зрения силы резания. Режущий инструмент, создающий более высокие усилия в трех направлениях, с большей вероятностью вызовет больший диапазон вибраций.

В работе [9] Schneider U. и соавторы повышают точность позиционирования промышленного робота с помощью внешних устройств контроля. При работе с роботом устанавливается специальное оснащение, которое отслеживает положение выходного звена и отправляет команды для корректировки.

Исследования, проводимые в Московском политехническом университете

На кафедре «Технологии и оборудование машиностроения» в Московском политехническом университете ведутся исследования в области технологического обеспечения качества на операциях полирования заготовок при производстве авиационных гидроагрегатов.

Цель работы заключается в сокращении трудоемкости полирования в производстве деталей авиационных агрегатов и обеспечении качества при роботизированном полировании. Основные задачи связаны с изучением режимов резания как основы для разработки алгоритмов позиционно-силового управления роботом, исследовании виброустойчивости процесса роботизированного полирования и взаимосвязей параметров процесса полирования с использованием технологии нейронных сетей, промышленной апробации разработанных алгоритмов и программ в производственных условиях.

Использование нейронных сетей (рис. 6) обусловлено тем, что на операции полирования можно обучить систему управления робота, подобно человеку, принимать решения на основе опыта. Включенный в систему генетический алгоритм должен создавать разнообразные наборы значений параметров путем перемешивания родительских данных из экспериментов и передавать их в нейронную сеть для оценки качества, которое зависит от качества поверхности, полученного с использованием этого набора данных.

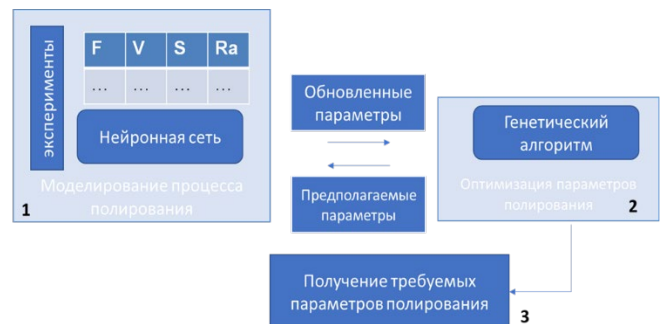


Рис. 6. Модель нейронной сети с генетическим алгоритмом [4]

Fig. 6. Neural network model with a genetic algorithm [4]

Известно применение нейронных сетей для распознавания связей в процессе полирования поверхности [13, 14].

Результаты пробных экспериментов обработки плоской поверхности позволяют утверждать, что роботизированные финишные операции могут применяться в технологических процессах изготовления деталей.

Также предметом исследований является возможность применения роботизированной отделочной обработки при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей и последующего применения подобных решений в производстве. Авторами создан алгоритм позиционно-силового управления промышленным роботом с учетом жесткости робота.

Для определения фактической жесткости промышленного робота были проведены эксперименты по нагрузке статической силой выходного звена робота. На основе полученных результатов установлено, что на качество обработки влияет не только жесткость робота, но и ее изменение вылета руки робота.

При моделировании кинематики промышленного робота использован метод Денавита-Хартенберга [15]. Используя матрицы Якоби, может быть получена взаимосвязь сил реакции робота с силой резания, возникающей при обработке:

$$\tau = J^T(q) \cdot F, \quad (3)$$

где τ – сила (момент) в суставе, $J^T(q)$ – матрица Якоби, F – сила (момент) действующие на внешнее звено.

Учитывая результаты экспериментов по жесткости и зная требуемые параметры качества поверхности, выбираются ограничения внешних сил (либо моментов), действующих на выходное звено робота. Полученные зависимости являются основой для создания постпроцессора промышленного робота и моделирования процесса обработки (рис. 7). Постпроцессор играет ключевую роль при автоматизации программирования промышленных роботов, особенно в таких задачах, как обработка материалов.

После разработки управляющей программы робота были проведены эксперименты

по обработке криволинейной поверхности. Составляющие экспериментальной установки представлены на рисунке 8. Установлено снижение вибрации в процессе обработки и уменьшение отжима режущего инструмента в сравнении с позиционным управлением.

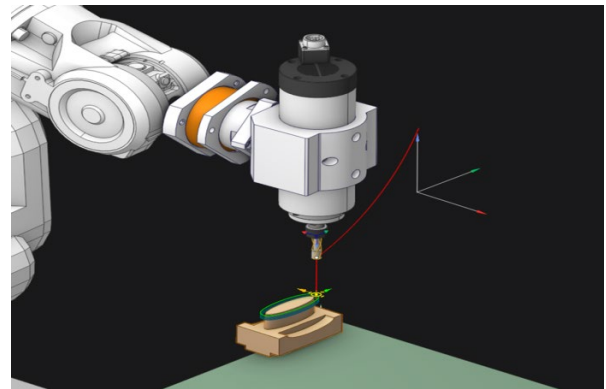


Рис. 7. Моделирование процесса обработки

Fig. 7. Finish simulation

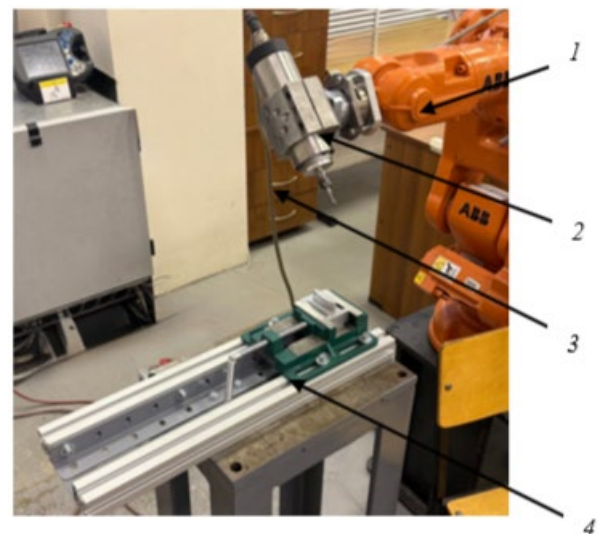


Рис. 8. Экспериментальная установка:

1 – робот ABB IRB 140; 2 – силомоментный датчик; 3 – инструментальный шпиндель; 4 – оснастка с заготовкой.

Fig. 8. Experimental unit:

1 – ABB IRB 140 robot; 2 – force–torque sensor; 3 – tool spindle; 4 – tooling with a workpiece.

Заключение

Промышленные роботы в настоящее время не могут полностью заменить классические станки с ЧПУ. Однако на данный момент в технологии изготовления многих деталей

сложной конфигурации присутствуют ручные слесарные операции, выполняемые рабочими высокой квалификации, но узкой специализации, что значительно усложняет и удорожает технологические процессы. Применение промышленных роботов в подобных операциях может значительно увеличить производительность и надежность технологического процесса. Исходя из возможностей роботов в совокупности с программным обеспечением, ручные операции тонкого фрезерования, шлифования и полирования возможно заменить на роботизированные. Для технологического обеспечения роботизированной обработки требуются дальнейшие исследования виброустойчивости процесса, а также возможностей позиционно-силового управления промышленными роботами. Будущие исследования будут направлены на создание универсального метода построения операций роботизированной обработки, учитывающего технологические возможности робота.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Xiaolong Ke and ets.** Review on robot-assisted polishing: Status and future trends // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102482>
2. **Fan Chen, Huan Zhao, Dingwei Li, Lin Chen, Chao Tan, Han Ding.** Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019. p. 391–403
3. **Gienke, O., Pan, Z., Yuan, L. et al.** Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. p. 104. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04053>
4. **Schwarz A.I., Mironov D.N., Vartanov M.V.** Methods of vibration suppression during robotic processing // *STANKOINSTRUMENT*, No. 3, (032), 2023. P. 34–41. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41>
5. **Pan, Z. & Zhang, H.** Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control // *Industrial Robot*, 2008. 35. No. 5. P. 400–409. <https://doi.org/10.1108/01439910810893572>
6. **J. Zhang, Y. Shi, X. Lin, Z. Li,** Parameter optimization of five-axis polishing using abrasive belt flap wheel for blisk blade // *J. Mech. Sci. Technol* 31, 2017. 4805–4812. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0717-z>
7. **J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris** Machining with robots: a critical review // 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens. Greece. 2011.

8. **Cen, L., Melkote, S. N., Castle, J., and Appelman, H.** A Method for Mode Coupling Chatter Detection and Suppression in Robotic Milling // *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.*, 2018. 140 (8). <https://doi.org/10.1115/1.4040161>
9. **Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M. et al.** Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016. p. 85, <https://doi.org/10.1007/s00170-014-.6021-2>
10. **Tunc, L., Stoddart, D.** Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate // *Int J Adv Manuf Technol* 89, 2017. P. 2907–2918. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9896-2>
11. **Wei Ji, Lihui Wang.** Industrial robotic machining: a review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. P. 1239–1255, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>
12. **Russell Stewart, Norvig Peter.** Artificial intelligence: a modern approach // Publishing house "Williams", 2016. P. 1408.
13. **Segreto T., Karam, S. & Teti, R.** Signal processing and pattern recognition for surface roughness assessment in multiple sensors monitoring of robot-assisted polishing. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90. 2017. P. 1023–1033 <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9463-x>
14. **Khalick Mohammad A.E., Hong, J. & Wang, D.** Polishing of uneven surfaces using industrial robots based on neural network and genetic algorithm. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 93, 1463–1471 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0524-6>
15. **Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann** A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // *Journal of Applied Mechanics*. 22 (2), 1955, P. 215–221. <https://doi.org/10.1115/1.4011045>

REFERENCES

1. Xiaolong Ke and ets. Review on robot-assisted polishing: Status and future trends // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102482>
2. Fan Chen, Huan Zhao, Dingwei Li, Lin Chen, Chao Tan, Han Ding, Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019. p. 391–403 <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.019>
3. Gienke, O., Pan, Z., Yuan, L. et al. Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, p. 104. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04053>
4. Schwarz A.I., Mironov D.N., Vartanov M.V. Methods of vibration suppression during robotic processing // *STANKOINSTRUMENT*, No. 3, (032). 2023. pp. 34–41. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41>
5. Pan, Z. & Zhang, H. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control // *Industrial Robot*, 2008. No. 5. pp. 400–409 <https://doi.org/10.1108/01439910810893572>

6. J. Zhang, Y. Shi, X. Lin, Z. Li, Parameter optimization of five-axis polishing using abrasive belt flap wheel for blisk blade // J. Mech. Sci. Technol 31, 2017. 4805–4812. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0717-z>
7. J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stavropoulos, G. Chrysoulouris Machining with robots: a critical review // 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens, Greece, 2011.
8. Cen, L., Melkote, S. N., Castle, J., and Appelman, H. A Method for Mode Coupling Chatter Detection and Suppression in Robotic Milling // ASME. J. Manuf. Sci. Eng., 2018. 140 (8): 081015. <https://doi.org/10.1115/1.4040161>
9. Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M. et al. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016. p. 85, <https://doi.org/10.1007/s00170-014-.6021-2>
10. Tunc, L., Stoddart, D. Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate // Int J Adv Manuf Technol 89, 2017/ 2907–2918. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9896-2>
11. Wei Ji, Lihui Wang. Industrial robotic machining: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. 1239–1255, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>
12. Russell Stewart, Norvig Peter. Artificial intelligence: a modern approach // Publishing house "Williams", 2016. 1408 p.
<http://i.uran.ru/webcab/system/files/bookspdf/is-kusstvennyy-intellekt-sovremennyy-podhod/229021.pdf>
13. Segreto T., Karam, S. & Teti, R. Signal processing and pattern recognition for surface roughness assessment in multiple sensors monitoring of robot-assisted polishing. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 90, 2017. 1023–1033 <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9463-x>
14. Khalick Mohammad A.E., Hong, J. & Wang, D. Polishing of uneven surfaces using industrial robots based on neural network and genetic algorithm. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 93, 1463–1471 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0524-6>
15. Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Journal of Applied Mechanics. 22 (2), 1955. 215–221. <https://doi.org/10.1115/1.4011045>

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 14.03.2025; одобрена после рецензирования 21.03.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 21.03.2025; accepted for publication 10.04.2025.