

Методы подавления вибраций при роботизированной обработке

А. И. Шварц, Д. Н. Миронов, М. В. Вартанов

Приведен обзор методов подавления вибраций при роботизированной обработке. Представлены исследования, проводимые в Московском политехническом университете в области роботизированной отделочной обработки.

Ключевые слова: полирование деталей, роботизированная обработка, вибрации при обработке, нейронные сети

УДК 621.9 | ВАК 2.5.6

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41

Введение

Растущие требования современной промышленности к снижению производственных затрат, повышению безопасности, сокращению сроков производства, повышению его эффективности и гибкости, а также адаптации рабочего пространства считаются повседневной задачей в области подготовки производства [1]. Опасные, повторяющиеся и утомительные ручные операции роботы могут выполнять быстрее, безопаснее и качественнее. Тем не менее, число роботов в механообработке остается незначительным. В прецизионной обработке по-прежнему в основном используются станки с числовым программным управлением (ЧПУ), что обусловлено высоким уровнем их точности и жесткости. Известны основные причины, сдерживающие широкое распространение механической обработки материалов роботами:

- недостаточная жесткость манипулятора робота;
- сложность преобразований на пути от CAD-модели к движениям робота;
- возникновение вибраций при обработке заготовки.

В настоящее время наблюдается тенденция усложнения конфигурации деталей, которые трудно поддаются обработке на классических станках с ЧПУ [2]. Для обработки сложнопрофильных заготовок могут потребоваться станки с большим числом осей, либо 6-осевые роботы. Промышленные роботы не всегда обеспечивают требуемую жесткость и не способны обеспечивать микронную точность и точное позиционирование. Однако они имеют большой потенциал для применений в областях, где не требуется микронная точность, а использование станков с ЧПУ приводит к излишним затратам.

Базовые конфигурации для финишной обработки

Существуют две основные схемы роботизированной обработки: «Деталь в руке» и «Инструмент в руке». Конфигурация «деталь в руке» – это схема, при которой робот переносит обрабатываемую деталь к стационарному устройству для финишной обработки. Во втором варианте выходное звено робота снабжается инструментальным шпинделем с настроенным инструментом, и робот движется по заданной траектории относительно обрабатываемой заготовки. Возможно применение позиционно-силового управления роботом, либо средств пассивной адаптации.

Конфигурация «Деталь в руке»

Данная конфигурация чаще всего применяется в случае, когда обрабатываемая заготовка имеет относительно небольшой размер. Схват позволяет роботу удерживать заготовку и манипулировать ею относительно устройства финишной обработки [3]. Данная схема имеет ряд преимуществ, одно из которых заключается в том, что операции загрузки/выгрузки робота часто можно совмещать с операцией чистовой обработки поверхности на одной рабочей позиции, то есть робот может снять заготовку с транспортно-устройства, обработать ее, а затем переместить на сборку или упаковку.

Дополнительным преимуществом является то, что использование более длинных приводных ремней, колес большего диаметра и более высокой мощности означает, что детали можно обрабатывать быстрее, с более длительными интервалами между сменами режущих инструментов. Последнее преимущество состоит в том, что достаточно

стабильная калибровка может быть достигнута с помощью устанавливаемых на полу относительно недорогих пассивных устройств позиционирования [4]. Поскольку ось податливости инструмента фиксирована, компенсация веса при этом постоянна.

Одним из недостатков схемы «Деталь в руке» является то, что иногда невозможно обработать всю поверхность детали за один переход. Это может быть связано как с доступом схвата робота, так и с ограничениями самого схвата. Часто единственным решением этой проблемы является размещение детали в промежуточном приспособлении и повторный захват детали по другой поверхности.

Конфигурация «Инструмент в руке»

Данный вариант в настоящее время менее распространен в производстве, чем схема «Деталь в руке», однако последние достижения в технологии активного управления усилием привели к расширению его применения. Конфигурация «инструмент в руке» используется в случаях, когда обрабатываемая деталь слишком велика или громоздка для переноски роботом, а также когда переустановка детали в схвате робота нежелательна. В этих случаях к роботу крепится шпиндель с инструментом, который по программной траектории проводит обработку [5]. Инструмент может дооснащаться как активным, так и пассивным устройством адаптации.

Менее дорогие пассивные силовые устройства могут использоваться там, где нет необходимости в точном контроле силы. Поэтому они более эффективны для относительно плоских контуров или для грубых операций по удалению заусенцев или шлифованию. Это связано с тем, что

пассивные устройства не имеют обратной связи, что затрудняет компенсацию изменений приложенной силы, когда робот перемещает инструмент вокруг детали.

С другой стороны, активные силовые устройства с замкнутым контуром управления идеально подходят для конфигураций «Инструмент в руке». Эти устройства постоянно компенсируют ускорение и гравитационные эффекты, поэтому они могут реализовывать точные уровни силы в любом направлении. Активные устройства хотя и более дороги, способны выполнять широкий спектр отделочных операций – от грубой шлифовки до тонкой полировки различных материалов. Кроме того, поскольку эти устройства имеют специальный контроллер, они предоставляют уникальные функции, которые значительно упрощают программирование роботов.

Также следует отметить, что при конфигурации «Инструмент в руке» могут быть применены подвижные установочные устройства для заготовок. В этом случае может двигаться как заготовка, так и робот.

Методы подавления вибрации при роботизированной обработке

Большинство промышленных роботов (ПР) построены по консольной схеме, в которой каждое из звеньев имеет свой привод и элементы управления. Применяются различные приемы конструирования роботов, чтобы достигнуть высокого уровня точности. Однако из-за особенностей редукторов и кинематики ПР склонны к вибрациям от сил резания [6]. Склонность к механическим вибрациям является основным препятствием использования ПР при механической обработке.

Применение адаптивных устройств

С целью подавления вибраций на данный момент предложен ряд технических и технологических решений. Так в работе [7] рассматривается активное выходное звено для манипулятора ПР (рис. 1).

В данной работе описано применение демпферов с постоянными магнитами, а также пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор) собственной разработки. С помощью силового контроля удалось значительно уменьшить разброс контактных сил в зоне резания и, как следствие, улучшить качество поверхности обрабатываемой детали. Однако при данном подходе присутствуют определенные недостатки:

- сложность проектирования подобных выходных звеньев;
- небольшой диапазон работы демпферов с постоянными магнитами;
- необходимость разработки дополнительного программного обеспечения (ПО), взаимодействующего с ПО системы управления робота;
- узкий диапазон работы звена.

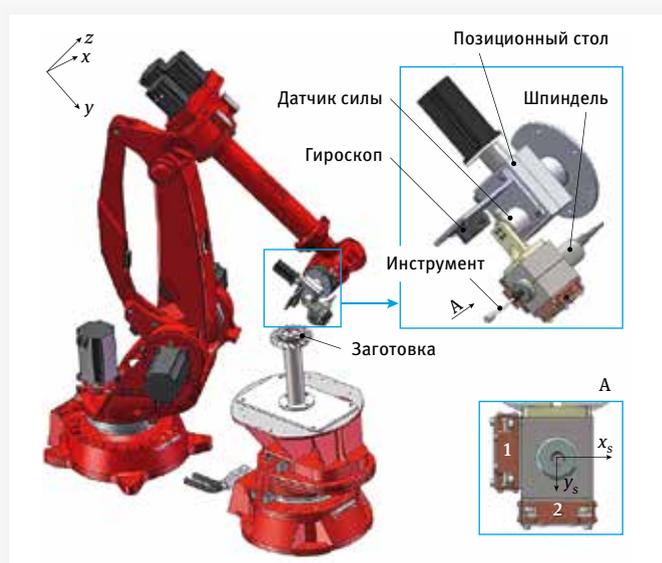


Рис. 1. Установка для финишной обработки лопаток ГТД с умным выходным звеном

Программная корректировка траекторий режущего инструмента

В работе [8] представлен разработанный программный алгоритм 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 относительно обрабатываемой поверхности;
- положение звеньев робота, то есть конфигурация робота при обработке;
- расположение заготовки в рабочей зоне робота;
- режимы резания.

Авторами было выбрано четыре произвольные конфигурации робота и угла положения режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности (рис. 2). После проведения экспериментов были сделаны выводы:

- вибраций можно избежать, изменив конфигурацию робота во время обработки: есть определенные конфигурации роботов, которые более склонны к вибрации;
- вибраций можно избежать, изменив 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 ее может и не быть: силы

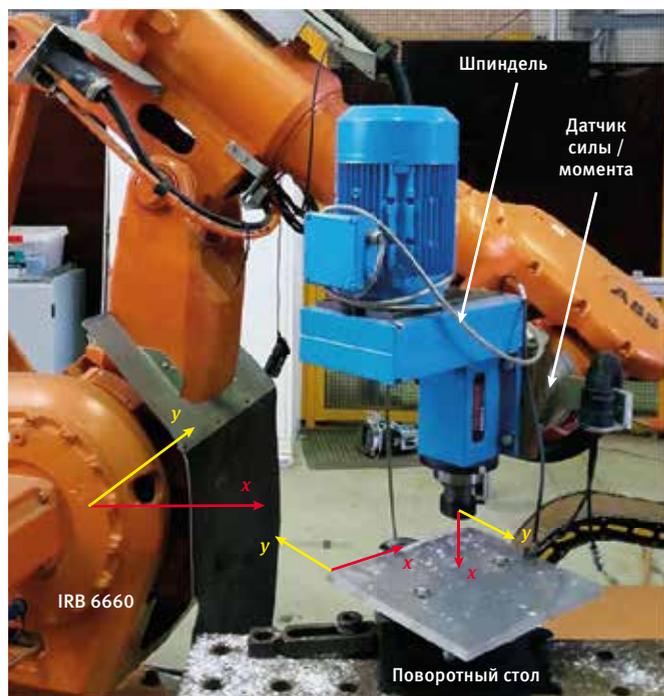


Рис. 2. Экспериментальная установка для проверки алгоритма подавления вибраций

резания, перпендикулярные поверхности заготовки, являются лучшим выбором;

- увеличение или уменьшение параметров резания, таких как глубина резания или величина подачи, может изменить угол между силой резания и поверхностью заготовки;
- каждое положение заготовки в зоне резания может привести к вибрации, и каждое положение резания можно стабилизировать;
- необходимо выбрать рациональный инструмент с точки зрения силы резания: режущий инструмент, создающий более высокие усилия в трех направлениях, с большей вероятностью вызовет больший диапазон вибраций.

Недостатки схемы:

- отсутствие исследований обработки криволинейных поверхностей, так как в таком случае при обработке необходимо менять угол звеньев относительно основания;
- необходимость разработки дополнительных алгоритмов обработки роботом;
- результаты применимы только для конкретной конфигурации робота.

Использование устройства, отслеживающего положение и режим работы выходного звена

В работе [9] точность позиционирования промышленного робота повысили с помощью внешних устройств контроля. При работе применяется специальное оснащение, которое отслеживает положение выходного звена и отправляет команды для корректировки режимов резания. Недостатки данной схемы:

- сложность установки и калибровки системы;
- ограниченная зона контроля данной установки;
- не всегда возможно отследить положение режущего инструмента, так как могут обрабатываться внутренние полости.

Исследования, проводимые в Московском политехническом университете

На кафедре «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета проводятся 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 можно сформулировать следующим образом:

- изучение режимов резания, как основы для разработки алгоритмов позиционно-силового управления роботом;

mitex™

2023

Международная
выставка инструмента
Moscow International
Tool Expo

МОСКВА,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

EXPOCENTRE
FAIRGROUNDS,
MOSCOW

7-10
НОЯБРЯ
NOVEMBER
2023



ОРГАНИЗАТОР / ORGANIZER

МОСКВА, РОССИЯ
ЕВРОЭКСПО



VIENNA, AUSTRIA
EUROEXPO
Exhibition and Congress Development Group

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР ВЫСТАВКИ / GENERAL SPONSOR



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ / SUPPORTED BY



СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПАРТНЕР / STRATEGIC PARTNER



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ / INFORMATION SPONSORS



ИНТЕРНЕТ-ПАРТНЕР / INTERNET-PARTNER

MASTER-FORUM.RU

12+ РЕКЛАМА ООО «ЕВРОЭКСПО»

WWW.MITEXPO.RU





Рис. 3. Модель нейронной сети с генетическим алгоритмом

- исследование виброустойчивости процесса роботизированного полирования и взаимосвязей параметров процесса полирования с использованием технологии нейронных сетей,
- промышленная апробация разработанных алгоритмов и программ в производственных условиях.

Использование нейронных сетей обусловлено тем, что на операции полирования можно обучить систему



Рис. 4. Состав экспериментальной установки: промышленный робот ABB IRB 140, инструментальный шпиндель, силомоментный датчик FTN-AXIA80 SI-200-8 / SI-500-20

управления робота принимать решения на основе опыта, подобно человеку.

Возможность оцувствления можно реализовать на основе применения силомоментного датчика. Известно применение нейронной сети для распознавания связей в процессе полирования поверхности [10]. Авторы проводят сравнение данного метода с другими методами выявления доминирующих факторов процесса полирования. В работе [11] представлены результаты исследований по полированию плоских поверхностей и прогнозированию съема материала в зависимости от режимов резания.

Учитывая накопленный опыт, разработана последовательность построения нейронной сети на основе генетического алгоритма:

1. проведение экспериментов для формирования статистических данных;
2. моделирование нейронной сети;
3. использование генетического алгоритма для увеличения выборки данных;
4. использование нейронной сети для выбора необходимых значений параметров, обеспечивающих требуемое качество обработки.

Для задачи прогнозирования шероховатости в зависимости от параметров процесса резания в качестве модели нейронной сети было решено использовать нейронную сеть с прямым распространением (рис. 3). На входной слой будет подаваться вектор параметров режимов резания:

- сила;
- скорость вращения инструмента;
- подача.

Количество скрытых слоев принято равным двум. Количество нейронов на скрытых слоях устанавливается равным десяти.

Для обучения нейронной сети был выбран метод обратного распространения ошибки. После обучения нейронная сеть устанавливает взаимосвязь параметров процесса резания и шероховатости. 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. Таким образом, совместная работа нейронной сети и генетического алгоритма способна сформировать рекомендуемые параметры режима резания для достижения требуемых параметров поверхности.



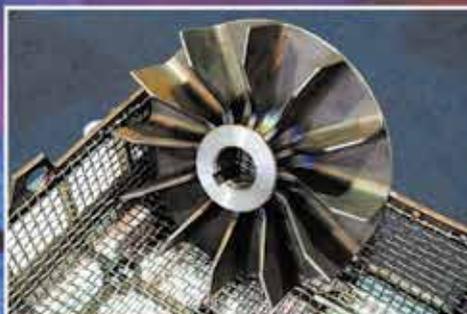
ТЕРМООБРАБОТКА

Шестнадцатая международная специализированная выставка

Единственная в России выставка
термического оборудования и технологий

12 - 14 сентября 2023

Россия, Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7



Основные разделы:

- » Оборудование для термической и химико-термической обработки
- » Промышленные печи и сушильные шкафы
- » Жаропрочная оснастка
- » Индукционное оборудование
- » Огнеупорные и теплоизоляционные материалы
- » Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- » Лабораторное и контрольно-измерительное оборудование
- » Вакуумная техника
- » Автоматизация производства

Организатор:



Независимый
аудит

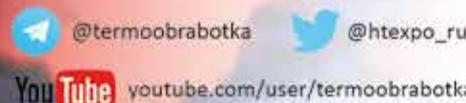


В рамках выставки "Термообработка - 2023" 13 сентября пройдёт
**Шестнадцатая международная научно-практическая конференция
"Инновационные технологии термообработки"**
Место проведения: Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7, конференц-зал

Информационная поддержка:



Официальный сайт выставки:
www.htexporus.ru



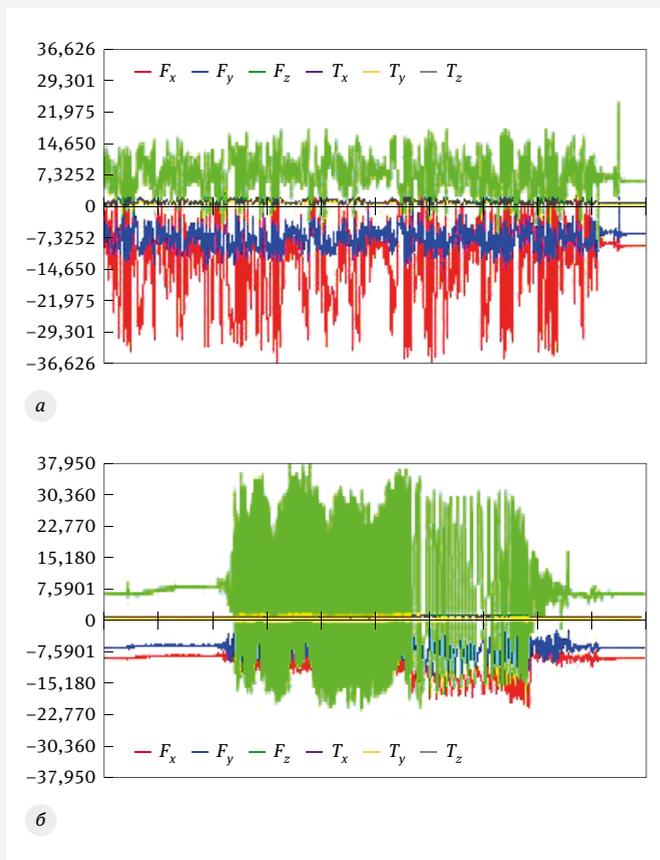
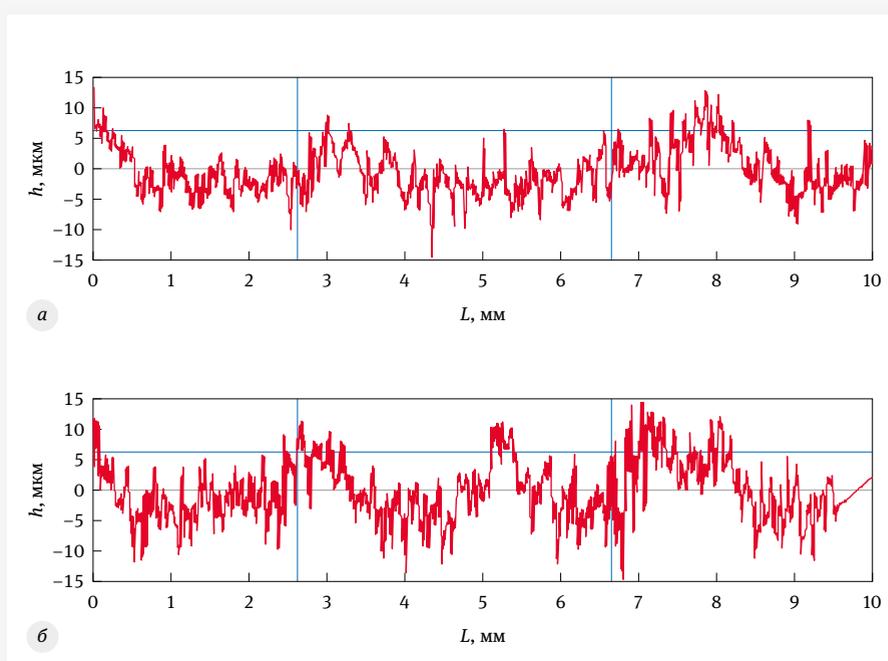


Рис. 5. Выводы с силомоментного датчика: а – скорость подачи 4 м / мин; скорость вращения шпинделя 1500 об. / мин; глубина резания 0,1 мм; б – скорость подачи 5 м / мин, скорость вращения шпинделя 2 000 об. / мин, глубина резания 0,1 мм

Обучение нейронной сети является важной и сложной задачей, так как от качества ее обучения напрямую зависит результат прогнозирования. Отдельной проблемой является формирование большого объема выборки для обучения и тестирования нейронной сети.

Могут быть заданы дополнительные входные данные, такие как обрабатываемый материал, зернистость инструмента, наличие СОЖ, предшествующее состояние поверхности детали.

Рис. 6. Профилограмма поверхности (длина измерений – 10 мм): а – Ra 3,42 мкм; б – Ra 2,84 мкм



Полученные экспериментальные результаты показывают, что даже при небольших объемах срезаемого материала возникают вибрации при обработке. Для эксперимента была выбрана обработка плоскости прямоугольной заготовки (рис. 4). Материал заготовки – алюминий Д16Т. На рис. 5 представлены силовые факторы процесса обработки.

Как видно из рис. 5, при обработке возникают колебания составляющих силы порядка 55Н, что негативно влияет на качество поверхности детали. Требуется значительное снижение колебаний силы. При данных режимах шероховатость обработанной поверхности Ra составляет 3–5 мкм, также присутствует волнистость поверхности после обработки. Полученные значения не соответствуют требованиям к качеству поверхности детали.

На рис. 6 приведены результаты измерений обработанной плоскости с помощью профилометра.

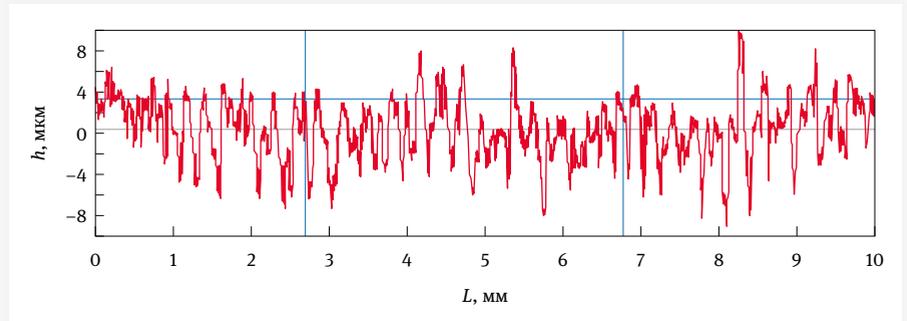
Полученные результаты доказывают, что в зоне резания происходят значительные колебания контактной силы. Полученная шероховатость поверхности не удовлетворяет требованиям финишной операции, также вибрации при обработке создают волнистость обработанной поверхности, из-за чего ухудшается плоскостность обработанной детали.

На основании пробных экспериментов был проведен подбор параметров режимов резания при постоянной конфигурации робота, чтобы исключить влияние взаимного положения звеньев манипулятора.

Изменив режимы удалось достичь шероховатости Ra 0,8–1,0 мкм. На рис. 7 представлена профилограмма одного из экспериментов.

Рис. 7. Профилограмма

(длина измерений – 10 мм): $R_a = 0,9$ мкм
(скорость подачи 8 м / мин, скорость вращения шпинделя 18 000 об./мин, глубина резания 0,02 мм)



Результаты пробных экспериментов позволяют утверждать, что роботизированные финишные операции могут применяться в технологических процессах производства деталей. Однако необходимы дальнейшие исследования, которые позволят обеспечить стабильность и надежность технологического процесса.

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.

Литература

1. **Pandremenos J., Doukas C., Stavropoulos P., Chrissolouris G.** Machining with robots: a critical review // 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens, Greece, 2011.
2. **Вартанов М.В., Зинина И.Н., Зотин Д.О.** Технологические возможности роботизированной отделочной обработки деталей в условиях многономенклатурного производства // Вестник РГАТУ. 2017. № 1 (40). С. 190–193.
3. **Pan Z., Zhang H.** Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control // Industrial Robot. 2015. Vol. 35, no. 5. PP. 400–409.
4. **Sörnmo O., Olofsson B., Schneider U., Robertsson A., Johansson R.** Increasing the Milling Accuracy for Industrial Robots Using a Piezo-Actuated High Dynamic Micro

5. **Krantz M., Andersson R.** Robotized Polishing and Deburring with Force Feedback Control // Master Thesis, Master Degree program in Robotics – University West, Department of Engineering Science. Trollhättan, SWEDEN, 2010.
6. **Zaghbani I.** Robotic High-Speed Machining of Aluminum Alloys // Proceedings of the 4th edition of the International Conference on High Speed Machining (ICHSM'2010). Harbin, China, 2011.
7. **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, pp. 391–403.
8. **Gienke O., Pan Z., Yuan L. et al.** Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 104, 2103–2116 (2019).
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. 85, 3–15 (2016).
10. **Segreto T., Karam S., Tet R.** Signal processing and pattern recognition for surface roughness assessment in multiple sensor monitoring of robot-assisted polishing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 90, 1023–1033 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9463-x>
11. **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>

Авторы

Шварц Александр Игоревич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета

Мионов Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета

Вартанов Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета