

УДК 681.5

Р.М. Мубаракишин¹, М.Р. Мубаракишин¹, П.С. Сотников¹

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛОВ И МАШИН В ПРОИЗВОДСТВЕ 4.0

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-3-10

Рассмотрены основные положения метода адаптивного управления процессом обработки деталей с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей ответственных узлов машин на примере технологического процесса производства соплового аппарата газотурбинного двигателя. Проанализированы основные требования к параметрам обрабатываемого центра и координатно-измерительной машины в составе технологической ячейки для решения задачи. Приведен пример роботизированной технологической ячейки с адаптивным управлением процессом шлифования сопловой лопатки для решения задачи обеспечения параметров площади проходного сечения соплового аппарата. Показаны основные компоненты, маршрутная карта по технологии и управлению потоками информации в автоматизированной роботизированной ячейке.

Информационное обеспечение и роботизация технологического процесса обеспечивают возможность применения ячейки в «безлюдном» варианте производства, повышают стабильность процесса, устраняют ручную установку и снятие оснастки с деталью в позициях контроля и обработки и снижают трудоемкость изготовления ответственных узлов машин.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, сопловой аппарат, лопатка, оптимизация, технология, адаптивное управление, роботизация.

R.M. Mubarakshin¹, M.R. Mubarakshin¹, P.S. Sotnikov¹

ADAPTIVE CONTROL AND AUTOMATION OF THE WORKPIECE MACHINING PROCESSES IN ORDER TO PROVIDE THE REQUIRED PERFORMANCE OF CRITICAL COMPONENTS AND MACHINES IN THE INDUSTRY 4.0 PRODUCTION

Considers the main provisions of the method of adaptive control of the workpiece machining process in order to provide the required performance of critical machine assemblies using the example of the technological process of production of a nozzle assembly for a gas turbine engine. The main requirements regarding parameters of the machining center and the coordinate measuring machine being parts of the technological cell for the task solution were analyzed. The example of the robotic technological cell with adaptive control of vane grinding process for solving the task with the maintenance of parameters of the nozzle assembly flow area is given. The main components, the flow process chart for the technology and the control of information flows in the automated robotic cell are shown.

The information supply and the robotization of technological process ensure the opportunity of the cell application for unattended production, increase the production stability, eliminate the manual installation and removal of the tooling and workpiece in the inspection and machining positions and reduce the complexity of the production of critical machine components.

Keywords: gas turbine engine, nozzle assembly, vane, optimization, technology, adaptive control, robotization.

¹Общество с ограниченной ответственностью «Урал Инжиниринг Консалтинг» Центр Прогрессивных Технологий [Ural Engineering Consulting Ltd. Center for Advanced Technologies]; e-mail: zpt@uralinco-centr.ru

Введение

Одной из основных характеристик технологических процессов обработки в современном «производстве 4.0»/«цифровом производстве» является «информационное обеспечение процесса на всех этапах: от момента получения заготовки до финишной обработки деталей, сборки узлов и механизмов» [1]. В значительной степени эффективность информационного обеспечения техноло-

гического процесса возрастает при изготовлении ответственных деталей машин, заготовки которых имеют погрешности взаимного расположения базовых поверхностей; сложную геометрическую форму, затрудняющую надежное базирование и зажим; малую протяженность базовых установочных поверхностей; длинную сложную размерную цепь в сборочном узле и др. Названные факторы приводят к погрешностям взаимного расположения

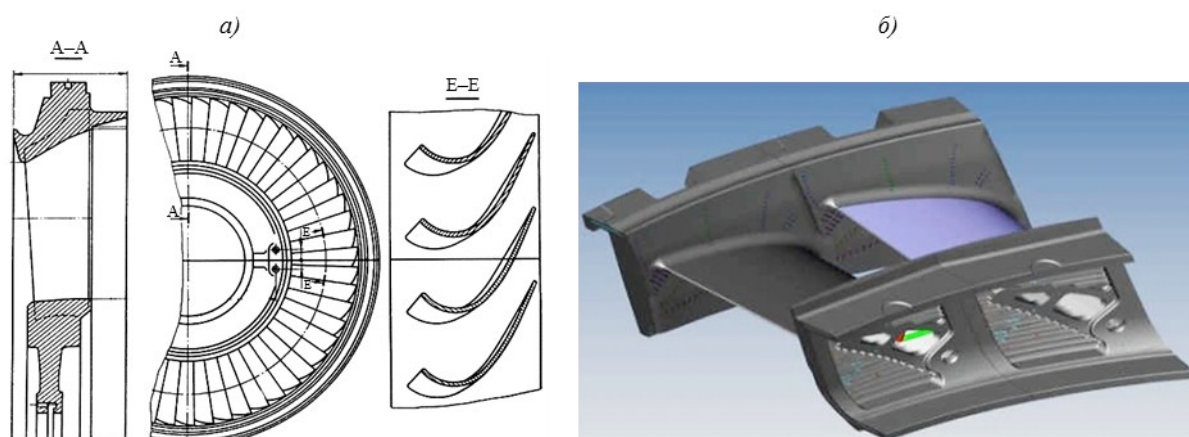


Рис. 1. Общий вид (а) и фрагмент модели (б) соплового аппарата

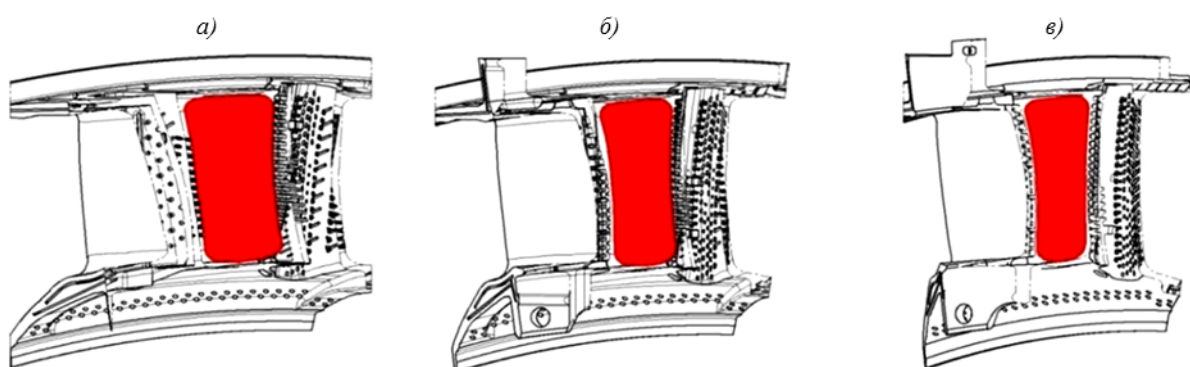


Рис. 2. Схема сечения межлопаточного канала фрагмента соплового аппарата (красным цветом отмечено сечение межлопаточного канала)

рабочих и установочных поверхностей деталей, что влияет на основные параметры при узловой сборке и в конечном итоге отражается на эксплуатационных показателях машины. Это в полной мере относится к сопловому аппарату авиационного двигателя. Сопловой аппарат (рис. 1, а) – важнейший узел газотурбинного двигателя (ГТД), параметры которого обеспечивают тяговые характеристики машины [2]. Экономичность турбины, ее КПД в первую очередь зависят от качества изготовления и сборки соплового аппарата, который является самым дорогим и наиболее ответственным узлом турбины [3, 4]. Основное назначение соплового аппарата – обеспечение подачи определенного объема газовой смеси в камеру сгорания, величина которого зависит от площади проходного сечения [5]. На рис. 1 приведены общий вид (рис. 1, а) и фрагмент модели соплового аппарата (рис. 1, б).

Вследствие различного положения лопаток (как показано на схеме, поясняющей параметры проходного сечения (рис. 2)), возможно получение параметра проходного сечения больше допуска (рис. 2, а), в пределах допуска (рис. 2, б) и меньше допуска (рис. 2, в).

Основным элементом, определяющим площадь проходного сечения соплового аппарата, является сопловая лопатка (рис. 3).

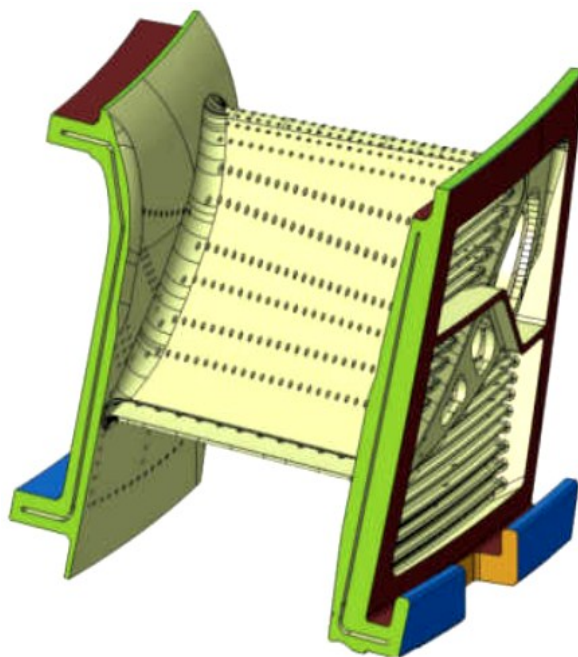


Рис. 3. Модель лопатки с основными поверхностями, обрабатываемыми шлифованием (выделено зеленым, синим и коричневым цветами)

Трудоемкость изготовления лопаток современной мощной газовой турбины достигает 40% от общей трудоемкости изготовления всех ее деталей [6]. Процесс производства лопаток характеризуется отклонением взаимного расположения базовых и рабочих поверхностей заготовок лопаток от номинальных, которое зачастую превышает допустимые значения в силу действия определенных факторов. Применяемое оборудование и технология изготовления заготовки лопатки методом литья по выплавляемым моделям обеспечивают получение основных размеров с припуском в пределах не точнее 0,6 мм, включая допуск на расположение ответственных поверхностей лопатки [7]: профиля пера, бандажной полки, торцевых поверхностей, которые являются установочными базами в процессе обработки и при сборке соплового аппарата. При определенных условиях погрешности расположения профиля пера относительно установочных элементов лопатки в сопловом аппарате могут превышать заданный допуск. В результате после обработки шлифованием получают лопатки, в которых расположение пера относительно базовых установочных поверхностей выходит за пределы поля допуска. Как следствие, после сборки лопаток в сопловой аппарат площадь проходного сечения не будет соответствовать требуемым значениям. Вероятность получения дефектной площади проходного сечения увеличивается при изготовлении комплекта лопаток только по верхней или аналогично по нижней границе поля допуска в результате суммирования накопленных граничных значений полей допусков лопаток при сборке. Технологические операции химико-термического упрочнения и нанесения покрытий увеличивают колебание фактических размеров лопатки, вносят дополнительные случайные погрешности, которые изменяют припуск. Последующая сборка увеличивает степень влияния «наследственной» погрешности изготовления. Как следствие, названные погрешности оказывают отрицательное влияние на величину площади проходного сечения, ее отклонение от заданных значений и результат процесса сборки становится недетерминированным. Поэтому при изготовлении важнейших компонентов соплового аппарата необходимо применение адаптивного управления

процессом, исключающего или сводящего к минимуму возникающие погрешности. Приведенная далее методология применима и для других процессов изготовления ответственных деталей и узлов машин.

Методы обработки и оборудование

Окончательное формообразование базовых поверхностей лопаток обеспечивается методами шлифования. Шлифование сопловых лопаток осуществляется либо в комплекте в барабане, либо ведется комплексная обработка основных типовых поверхностей лопаток на пятикоординатном многофункциональном обрабатывающем центре с магазином шлифовальных кругов [8]. По первому варианту шлифование сопловых лопаток осуществляется в сборе в барабане, зачастую на модернизированных токарно-лобовых станках бакелитовыми кругами без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [9]. Лопатки базируются в барабане по поверхностям, которые не детерминированы в достаточной степени относительно важнейшей рабочей поверхности лопатки – профиля пера, определяющего величину площади проходного сечения. Сборка лопаток в аппарат с комплектом лопаток, у которых сборочная (установочная) база находится не в пределах допуска относительно рабочих поверхностей пера, с большой долей вероятности приводит к тому, что площадь проходного сечения даже двух смежных лопаток не соответствует техническим условиям. Соответственно и сопловой аппарат в целом не будет иметь должных параметров площади проходного сечения. Это приводит в конечном итоге к отклонению выходных параметров ГТД от заданных значений. Необходимое значение площади проходного сечения достигается переборкой соплового аппарата, что приводит к значительным потерям времени и увеличению трудоемкости производства. Вспомогательные этапы могут достигать 80% времени производства и, следовательно, представляют собой наибольший и эффективный потенциал для оптимизации процесса.

По второму варианту комплексное шлифование всех поверхностей лопатки осуществляется на пятиосевом станке [10], общий вид и компоновка которого приведены на рис. 4.

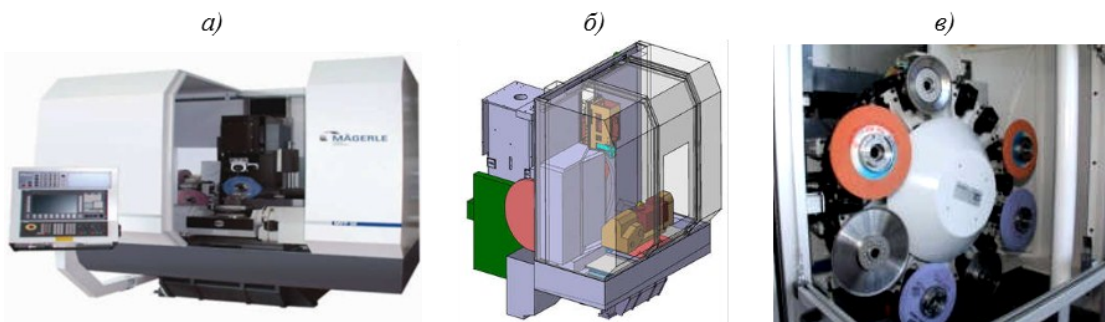


Рис. 4. Пятиосевой многооперационный шлифовальный станок MFP 50 CNC с поворотным-вращающимся столом для комплексной обработки лопаток:

а – общий вид; б – компоновка; в – магазин инструментов

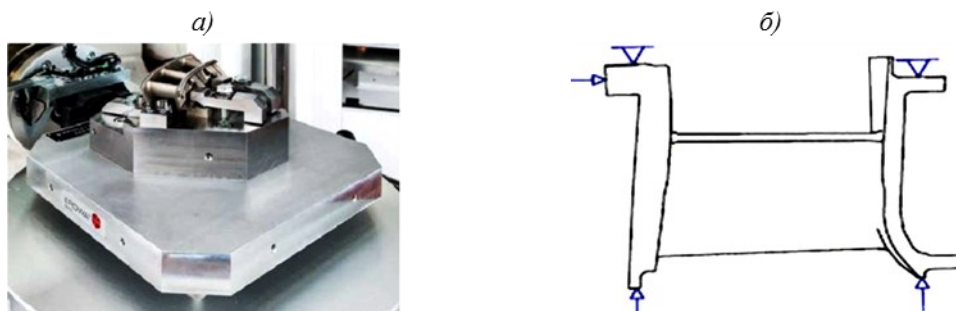


Рис. 5. Установка заготовки литой лопатки:

а – общий вид стола с оснасткой; б – схема установки заготовки лопатки по базовым точкам

Технология реализуется [8] при минимальном количестве установок лопатки. Установка заготовки литой лопатки производится по шести базовым точкам в специальном приспособлении (рис. 5), которое, в свою очередь, закрепляется на самоцентрирующейся паллете типа EROWA, быстро устанавливаемой на поворотно-вращающийся стол.

Применение шлифовального центра позволяет заменить нестабильный процесс шлифования в барабане на детерминированный процесс шлифования поверхностей лопатки электрокорундовыми кругами на керамической связке с непрерывной правкой и охлаждением СОЖ.

Однако и в этом случае не учитывается возможная недопустимая погрешность расположения поверхности пера относительно обрабатываемых поверхностей лопатки, являющихся установочными базами при сборке в сопловой аппарат. Данное обстоятельство, как сказано ранее, при больших отклонениях профиля пера может привести к погрешности в значениях площади проходного сечения даже со шлифованными в пределах допуска на остальные размеры лопатки.

Решением вопроса является предварительный контроль лопатки (перед операцией шлифования) на координатно-измерительной машине (КИМ) для определения пространственных отклонений профиля пера с соответствующим разворотом лопатки на необходимый угол путем внесения коррекции в управляющую программу обрабатывающего центра. Это позволяет избежать непроизводительных потерь из-за трудоемкого процесса повторной сборки соплового аппарата в стапеле для обеспечения площади проходного сечения и тяговых характеристик машины, т. е. «адаптация на всех уровнях является основополагающим признаком системного производства 4.0» [11].

Технологические параметры и свойства оборудования

Основные технологические параметры и свойства оборудования, которые необходимо рассматривать при выборе многооперационного станка для пятиосевой обработки лопаток и КИМ для высокопроизводительного и надежного функционирования ячейки, приведены далее.

Станок должен обладать достаточным уровнем автоматизации основных и вспомогательных процессов для снижения влияния человеческого фактора, а также уменьшения количества установок лопатки и иметь следующие модули:

- пятиосевой обработки с двух-трехосевым поворотным столом;
- хранения и автоматической смены шлифовальных кругов и инструментов, правящих роликов;
- подачи СОЖ под давлением в зону резания и перемещения сопел с автоматической компенсацией износа шлифовального круга.

Модуль правки шлифовального круга должен включать модуль профильной правки с помощью алмазного ролика в режиме CD и ID либо алмазного диска в режиме ID. Правка осуществляется автоматически по системе коррекции положения шлифовального круга.

На станке должна быть возможность комплексной обработки шлифованием и фрезерованием поверхностей лопаток за минимальное количество установок лопаток. Программное обеспечение станка должно иметь модуль связи с КИМ для автоматического внесения изменений в управляющую программу на основании данных, полученных от КИМ для обеспечения оптимальной площади проходного сечения.

Станок может иметь собственный модуль контроля поверхностей лопатки (рис. 6) и внесения коррекций в управляющую программу шлифования.

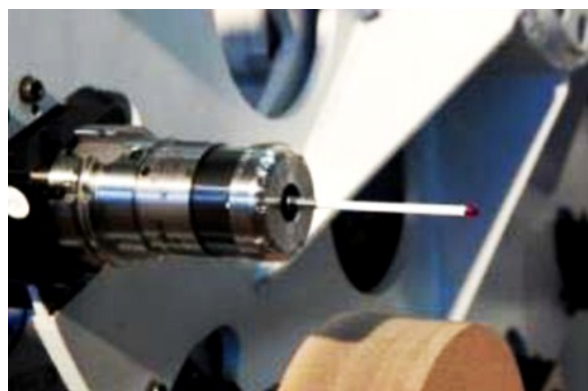


Рис. 6. Измерительный модуль для контроля поверхностей лопатки

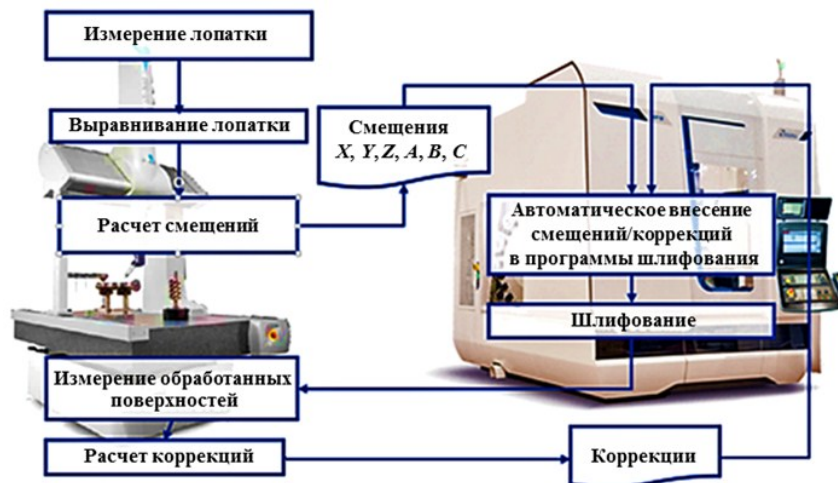


Рис. 7. Алгоритм процесса контроля и обработки лопатки для обеспечения оптимальной площади проходного сечения

Данный модуль может использоваться для контроля правильности установки лопатки с оснасткой в станке при наладке и выборочном межоперационном контроле после обработки поверхностей при изготовлении. Числовое программное управление (ЧПУ) станка в перспективе должно иметь программу внесения коррекций для компенсации выявленных погрешностей установки и динамических погрешностей, возникающих в процессе обработки.

Помимо обычных требований к КИМ, для контроля сложных деталей с неопределенными поверхностями [12] такая машина с роботизированной ячейкой должна работать в цеховых условиях, предпочтительно иметь систему активного типа для непрерывного сканирования поверхностей лопатки. Последнее важно для надежного контроля критичных зон лопатки с резким градиентом вектора движения – типа кромки пера.

Координатно-измерительная машина должна иметь программное обеспечение для автоматического расчета смещений (X, Y, Z, A, B, C) для обеспечения оптимальной площади проходного

сечения, а также программное обеспечение для автоматического расчета и передачи на станок коррекций по результатам предварительного и окончательного контроля.

Программное обеспечение КИМ должно осуществлять совмещение измеренной литой лопатки с номинальной моделью, построенной конструктором в CAD, и выравнивание/поворот лопатки с целью обеспечения оптимальной площади проходного сечения. После измерения и выравнивания программа рассчитывает смещение размеров лопатки относительно размеров модели по шести координатам – трем линейным (X, Y, Z) и трем угловым (A, B, C), с учетом обеспечения припуска для механической обработки полок лопатки.

Технология контроля и шлифования сопловой лопатки

Алгоритм контроля и обработки лопатки для обеспечения площади проходного сечения соплового аппарата приведен на рис. 7. Алгоритм включает следующие основные переходы и операции: измерение лопатки, выравнивание лопатки, расчет линейных (X, Y, Z) и угловых (A, B, C) смещений, автоматическое внесение смещений/коррекций в программу шлифования, шлифование поверхностей, измерение обработанных поверхностей на КИМ, расчет коррекций, ввод коррекций.

При контроле заготовок перед шлифованием с помощью КИМ измеряют перо лопатки (рис. 8) и выравнивают ее по параметрам, определяющим оптимальную площадь проходного сечения.

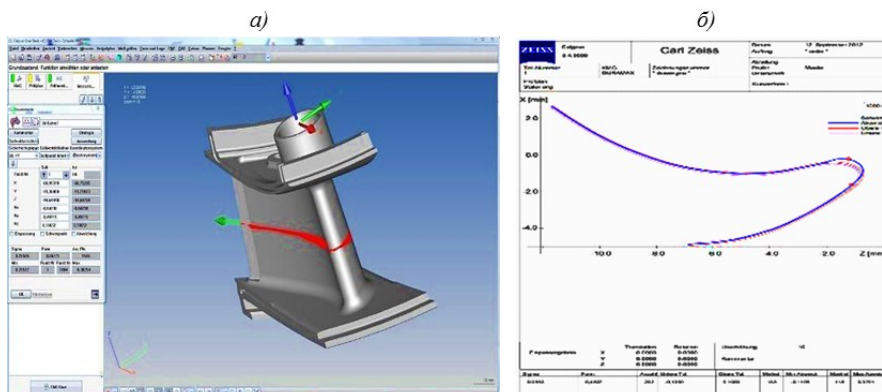


Рис. 8. Измерение лопатки по сечениям:
а – модель с траекторией контроля; б – протокол измерения

По результатам измерения на КИМ рассчитывают шесть координат смещения – три линейных (X, Y, Z) и три угловых (A, B, C) – как отклонения от электронной модели [13], которые учитываются в программе шлифования.

Все измеренные данные лопатки хранятся в системе управления ячейки машины и передаются на станок в автоматическом режиме при установке соответствующей лопатки, которой присвоен индивидуальный номер. Программа автоматически производит уточнение размеров лопатки по шести координатам и корректировку в управляющей программе станка.

После контроля лопатку в оснастке на паллете устанавливают в станок, осуществляют необходимый угол разворота лопатки и производят пооперационную обработку шлифованием предварительных базовых поверхностей (рис. 5, б) и основных поверхностей лопатки (рис. 3).

Кольцевая канавка на данном станке обрабатывается шлифованием эльборовыми кругами на черновых и чистовых проходах. Обработка радиусных сопряжений поверхностей канавки осуществляется фрезерованием.

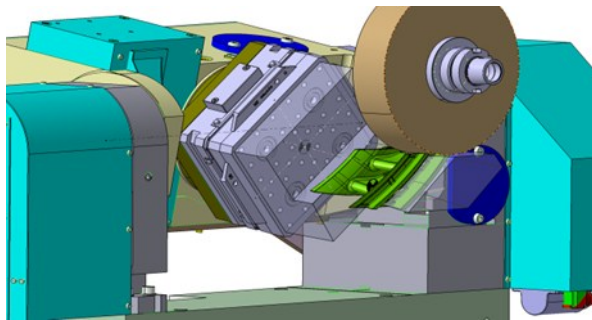


Рис. 9. Моделирование процесса шлифования поверхностей лопатки

Для исключения столкновений при шлифовании проводится моделирование процесса обработки всех поверхностей лопатки в системе NX. Эскиз моделирования одной из операций на станке Mägerle MFP 50 приведен на рис. 9.

Автоматизация процесса

Современное производство 4.0 характеризуется, помимо обеспечения информационных связей на всех этапах изготовления, высоким уровнем автоматизации процесса. Для рассматриваемой ячейки целесообразен третий уровень гибкой автоматизации процесса [14, 15] на основе применения промышленных роботов для вспомогательных операций. Пример реализованной технологической роботизированной ячейки «Обработывающий центр – координатно-измерительная машина» приведен на рис. 10.

В состав роботизированной ячейки входят следующие основные компоненты:

- пятиосевой шлифовальный станок Mägerle MFP-050.65.65;
- КИМ типа Global Advantage 09.12.08;
- система автоматизации процесса типа Wenger Automation;
- робот типа KUKA KR120 R2'500 для загрузки/разгрузки паллет;
- пятипозиционная станция загрузки/разгрузки лопаток;
- система очистки/фильтрации СОЖ типа Knoll VL1000/6000 Coolant Filtration System.

В данной ячейке реализуются решения для выполнения задачи по шлифованию лопатки с обеспечением требуемых параметров площади проходного сечения соплового аппарата.

Маршрутная карта по технологии основных и вспомогательных операций/переходов, реализуемых в роботизированной ячейке, приведена в таблице.

Фрагмент цикла управления компонентами и потоками информации в роботизированной ячейке, согласно переходу считывания информации паллеты маршрутной карты по технологии обработки с визуализацией процессов с помощью использования графических пиктограмм, показаны на рис. 11.

Автоматизация процесса путем роботизации вспомогательных операций обеспечивает возможность применения ячейки в «безлюдном»

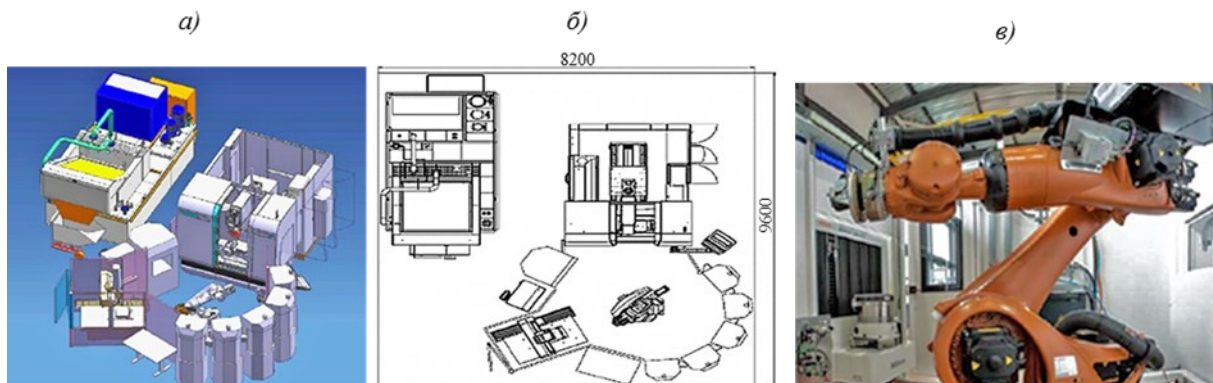


Рис. 10. Технологическая роботизированная ячейка «Обработывающий центр – координатно-измерительная машина»:

а – 3D-модель; б – планировка; в – фрагмент общего вида

**Маршрутная карта по технологии обработки сопловой лопатки в роботизированной ячейке
«Обрабатывающий центр – координатно-измерительная машина»
с числовым программным управлением (ЧПУ)**

Наименование операций/переходов	Компоненты ячейки, участвующие в операции
Снятие паллет с загрузочной станции	ЧПУ ячейки Загрузочная станция Робот KUKA
Считывание информации паллеты	ЧПУ ячейки Робот KUKA RFID-система
Установка паллеты в КИМ	ЧПУ ячейки Робот KUKA КИМ Global SF
Передача на КИМ данных паллеты Старт предварительного измерения	ЧПУ ячейки КИМ Global SF
Калибровка Проверка состояния паллеты Выравнивание зажимного устройства (если необходимо) Выравнивание детали перед шлифованием Проверка смещения детали Генерирование итогового файла	КИМ Global SF
Получение параметров смещений детали	ЧПУ ячейки КИМ Global SF
Перемещение паллеты с КИМ на станок	Робот KUKA КИМ Global SF MFP-050
Активирование смещений детали	MFP-050
Обработка детали с учетом смещений и коррекций	MFP-050
Перемещение паллеты с MFP-050 на КИМ	ЧПУ ячейки Робот KUKA КИМ Global SF MFP-050
Передача на КИМ данных паллеты Измерение детали	ЧПУ ячейки КИМ Global SF
Калибровка Проверка состояния паллеты Проверка смещения детали Измерение обработанных поверхностей Генерирование итогового файла	КИМ Global SF
Получение параметров детали и коррекций	ЧПУ ячейки КИМ Global SF
Перемещение паллеты с КИМ на загрузочную станцию	ЧПУ ячейки Загрузочная станция Робот KUKA КИМ Global SF

Компоненты ячейки и потоки информации



Рис. 11. Фрагмент цикла работы роботизированной ячейки

варианте производства, повышает стабильность процесса, роботизирует перемещение оснастки с деталью большой массы в позиции контроля и обработки и снижает в целом трудоемкость операции.

Заключения

1. На примере изготовления соплового аппарата ГТД показана роль информационного обеспечения технологического процесса для обеспечения площади проходного сечения и тяговых характеристик машины.

2. Рассмотрена методология адаптивного управления процессами обработки лопаток с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей соплового аппарата по площади проходного сечения.

3. Применение активной обратной связи и адаптивного управления процессом обеспечивает получение требуемых эксплуатационных показателей

соплового аппарата по площади проходного сечения, уменьшает трудоемкость изготовления и сборки и устраняет значительные непроизводительные потери времени при переборке соплового аппарата.

4. Применение шлифовального станка обеспечивает детерминированный процесс шлифования поверхностей лопатки, повышает производительность и стабильность процесса и минимизирует отклонения деталей по геометрическим параметрам от требований конструкторской документации.

5. Автоматизация процесса с роботизацией вспомогательных операций снижает трудоемкость операций и обеспечивает возможность применения ячейки в «безлюдном» варианте производства.

Благодарности

Авторы благодарят фирму «Мегерле» (Mägerle AG Maschinenfabrik) за предоставленные материалы по автоматизации процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Westkämper E. Industrie 4.0 – Zukunftsperspektiven. Vorträge 10. Internationalen Laser- und Füge symposium. Dresden, 2018. S. 10–12.
2. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. Ч. I. С. 456–457.
3. Елисеев Ю.С., Бойцов А.Г., Крымов В.В. и др. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2003. 510 с.
4. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей. М.: ЦИАМ, 2004. 421 с.
5. Ляшков В.И. Тепловые двигатели и нагнетатели. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 124 с.
6. Братухин А.Г., Решетников Ю.Е., Иноземцев А.А. и др. Основы создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов. М.: Авиатехинформ, 1999. С. 27–33.
7. ГОСТ 23537–79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1979. 33 с.
8. Мубаракшин Р.М. Оптимизация вариантов технологий и методов шлифования лопаток газотурбинных двигателей // Технология машиностроения. 2018. №2. С. 10–20.
9. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
10. Hohe Flexibilität für anspruchsvolle Anwendungen. Fehrltorf: Magerle AG Maschinenfabrik. 2015. 20 s.
11. Westkämper E. Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Springer Vieweg. 2016. 316 s.
12. Мубаракшин Р.М. Повышение эффективности производства за счет применения средств измерений // Инновация. 2007. №9. С. 48–49.
13. Зубарев Ю.М., Косаревский С.В., Ревин Н.Н. Автоматизация координатных измерений: учеб. пособие. СПб.: ПИМаш, 2011. 160 с.
14. Соломенцев Ю.М. Технологические основы гибких производственных систем. М.: Высшая школа, 2000. 255 с.
15. Lang G., Salje E. Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen. Essen: Verlag-Vulkan, 1989. 198 p.