

---

## Введение

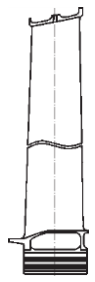
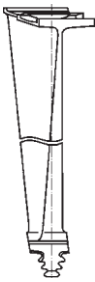
Одной из важнейших характеристик технологических процессов обработки в современном цифровом производстве – «производстве 4.0» – является информационное обеспечение процесса на всех этапах: от момента получения заготовки до финишной обработки деталей, сборки узлов и механизмов. Значимость информационного обеспечения технологического процесса существенно возрастает при изготовлении ответственных деталей машин, заготовки которых имеют погрешности взаимного расположения базовых поверхностей, сложную геометрическую форму, затрудняющую надежное базирование и зажим. Это в полной мере относится

к обработке лопаток авиационного двигателя.

Эффективность компрессора, КПД турбины и топливная экономичность в значительной степени зависят от качества изготовления лопаток. Трудоемкость изготовления лопаток современной мощной газовой турбины достигает 40% общей трудоемкости изготовления всех ее деталей [1]. Окончательное формирование параметров точности, качества поверхности, усталостной прочности лопаток осуществляется на финишных операциях механической обработки, к которым относятся процессы шлифования, размерной полировки.

Основные элементарные поверхности лопатки [2], обрабатываемые на финишной операции, приведены в табл. 1.

**Табл. 1.** Основные элементарные поверхности лопатки

Элементарная поверхность	Эскиз поверхностей	Требования к поверхностям
Входная – выходная кромки пера		Точность: – радиус $R = 0,1 \dots 0,5$ мм с допуском $\pm 0,05$ мм. Качество: – шероховатость $Ra \leq 0,63 \dots 0,8$ мкм; – не допускаются прижоги, риски, трещины и другие локальные дефекты
Спинка, корыто пера. Поверхности сопряжения пера и полки		Точность: – радиус $R = 0,5 \dots 2,0$ мм с допуском $\pm 0,05$ мм. Качество: – шероховатость $Ra \leq 0,63 \dots 0,8$ мкм; – не допускаются прижоги, риски, трещины и другие локальные дефекты

Значительно влияние величины радиуса и формы кромки на показатели работы двигателя. На ближайшую перспективу поставлена задача изготовления лопаток с радиусом входной кромки  $R < 0,1$  мм, с допуском  $\pm 30$  мкм, формирование эллиптического профиля входной кромки. Уменьшение радиуса, эллиптическая форма кромок в сравнении с радиусной обеспечивают повышение длительности жизненного цикла лопаток до 25%, снижают расход топлива [3]. Эллиптическая форма кромки существенно уменьшает возможность образования турбулентности воздушного потока на поверхности лопатки [4; 5]. Формирование показателей качества и точности осуществляется на операции финишной обработки, как правило, методом ручной полировки. Процесс ручной полировки не детерминирован, соответственно нестабилен, сопровождается значительным браком и характеризуется высокой трудоемкостью, вредностью. Невозможность удовлетворения вышеназванных, все более возрастающих требований к качеству и точности поверхности лопатки методом ручной обработки очевидна. Применяемое оборудование и технология изготовления заготовки лопатки методами штамповки и литья по выплавляемым моделям обеспечивают получение основных размеров с припуском в пределах 0,6 мм, включая допуск на расположение ответственных поверхностей лопатки [6; 7]: профиля пера, бандажной полки, торцевых поверхностей, – которые являются установочными базами в процессе обработки. При определенных условиях погрешности расположения профиля пера относительно установочных элементов лопатки могут превышать заданный допуск. Отклонение фактических размеров и геометрии лопаток от

номинальных значений после предварительных операций затрудняет обеспечение показателей точности, а в ряде случаев делает его невозможным. Для компенсации отклонений требуется адаптивное управление основными параметрами процесса автоматизированной обработки. Необходимость применения автоматизированной адаптивной размерной полировки возрастает в современном производстве: «Адаптация на всех уровнях является основополагающим признаком современного производства 4.0» [8].

### Методы автоматизированной, программно управляемой адаптивной размерной полировки

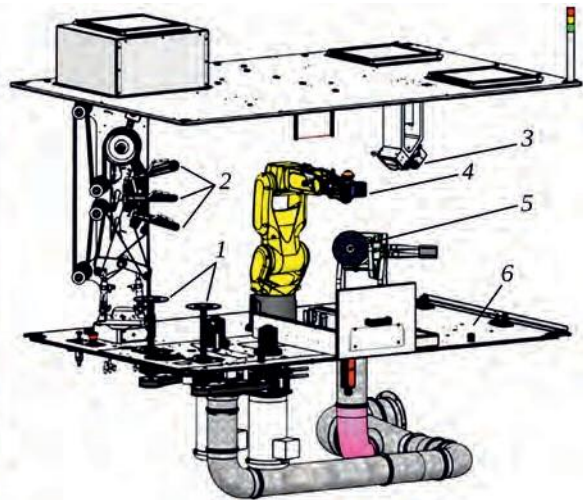
Для решения задач автоматизированной размерной полировки лопаток используются две основные компоненты оборудования, обеспечивающие:

- 1) формообразование поверхностей лопатки за счет кинематики робота (роботизированного перемещения лопатки и инструментов);
- 2) формообразование поверхностей лопатки за счет кинематики станка.

В первом варианте лопатка базируется в схвате робота по установочным базам. В случае обработки больших лопаток в схвате робота закрепляется инструмент, а лопатка устанавливается в горизонтальном положении в поворотной оснастке. Во втором варианте лопатка закреплена в оснастке станка. Формообразование осуществляется за счет взаимного движения инструмента и лопатки. Для принятия решения о применении той или иной схемы автоматизированной полировки лопатки важно проанализировать основные компоненты системы, определяющие трудоемкость процесса, качество и точность получаемого изделия.

Рассмотрим первый вариант размерной обработки кромок, спинки и корыта пера лопатки – в роботизированной системе, в которой рабочие формообразующие и вспомогательные перемещения лопатки осуществляются промышленным роботом. К числу апробированных и применяемых в производстве лопаток ведущими мировыми производителями, в том числе предприятиями России, относятся роботизированные ячейки, разработанные фирмами AV&R (Канада) [9], Fastems [10], Flexmill (Финляндия), Arcos (Италия) [11], MTL 3D Ltd. (Израиль) [12]. Ниже приведен анализ компоновок и технологических возможностей некоторых ячеек.

Роботизированная ячейка AV&R [9] (рис. 1) рассчитана на обработку лопаток габаритами 25...300 мм. В ячейке производится адаптивная размерная обработка входных, выходных кромок с минимальным радиусом 0,2 мм и неадаптивная безразмерная полировка спинки и корыта пера, полки и переходных частей



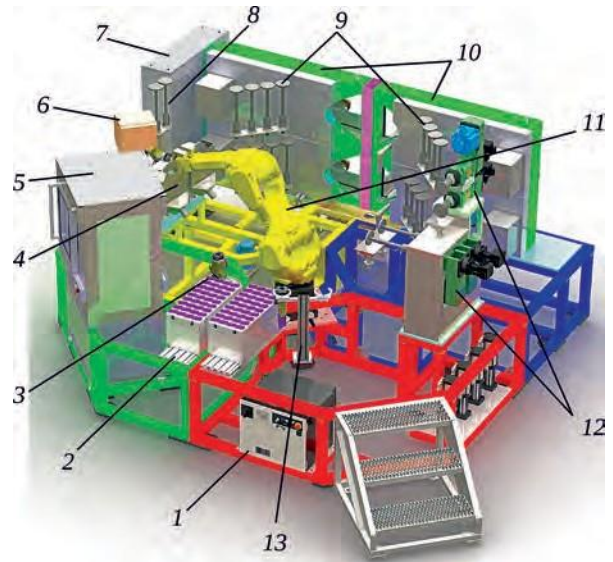
**Рис. 1.** Общий вид и основные позиции роботизированной ячейки AV&R [9]:

1 – вертикальные профилирующие круги для полировки входной/выходной кромки; 2 – три контактных ролика, шлифовальная лента для полировки пера; 3 – двойной лазерный сканер для контроля кромки пера; 4 – головка робота с захватом для лопатки и различных инструментов в полировальный шпиндель; 5 – шпиндель для полировки переходной части и полки; 6 – место для магазина инструмента

с радиусом до 1 мм. Шестикоординатный робот Fanuc LR Mate 200 (грузоподъемность 7 кг; повторяемость позиционирования  $\pm 0,02$  мм; момент силы 11,9 Нм) обеспечивает перемещения лопатки в цикле обработки и позиционирование в измерительной системе. Имеются две позиции для шлифования лопатки с обеих сторон абразивными кругами и ленточно-шлифовальная позиция с тремя типами лент. На модулях со шлифовальными кругами осуществляется шлифование переходных частей.

Ячейка AV&R оснащена многопозиционным магазином инструментов, смена которых осуществляется в цикле автоматически. В верхней зоне расположена рамка с лазерным датчиком Balluff, в которой проверяется наличие и правильность установки лопатки, инструмента. На корпусе захвата робота установлен правящий ролик со свободным вращением и оправка для захвата сменного инструмента с обрабатывающими дисками. Во время правки алмазным роликом осуществляется компенсация износа диаметра кругов. К числу существенных недостатков компоновки AV&R, выявленных в процессе эксплуатации относятся:

- сложная конструкция ленточной установки малой жесткости, которая пригодна для лабораторных исследований. Установка разработана для решения задач как прототип и существенно отличается от ранее выпускавшихся фирмой серийных установок;
- слабая платформа Festo на пневматической подушке, не выдерживающая нагрузок;
- слабый робот недостаточной грузоподъемности (7 кг);
- требование к давлению воздуха в ячейке выше стандартных 6 атм;



**Рис. 2.** Роботизированная ячейка RoboMate [12]:

1 – контроллер робота; 2 – палеты; 3 – станция очистки лопатки перед измерениями; 4 – модуль обработки кромок; 5 – система измерения; 6 – модуль измерения кромок; 7 – электрошкаф; 8 – модуль замены инструмента; 9 – станция хранения инструмента; 10 – модули ленточной обработки; 11 – робот; 12 – модули обработки кругами; 13 – станция смены схвата

– воздушное охлаждение при обработке лентой, зачастую не позволяющее добиваться требуемой шероховатости поверхности и небезопасное при работе с титановыми сплавами.

В ячейке фирмы Argos [11] применяется робот Fanuc грузоподъемностью 10 кг для выполнения транспортных и технологических операций. Ячейка включает в себя ленточный шлифовальный модуль с четырьмя позициями; полировальный модуль обработки с автоматичес-

кой сменой инструмента; магазин инструментов на 16 позиций; полировальный модуль для больших кругов без автоматической смены; станцию для шлифования с применением смазочно-охлаждающих технологических средств; станцию загрузки/выгрузки лопаток, установленных в палеты.

Ячейка фирмы MTL 3D Ltd. (рис. 2) имеет модули обработки с абразивными кругами и лентами и два измерительных модуля 5, 6 для контроля поверхностей лопатки на стадиях процесса.

Модули обработки состоят из следующих позиций:

- шлифовальных позиций 12 с поддержанием заданной скорости шлифования; замена кругов производится автоматически;

- полировальных позиций 4 с частотным регулированием, в которых смена кругов производится вручную;

- ленточно-полировальных позиций 10 с четырьмя абразивными лентами для полирования спинки и корыта пера, каждая лента имеет автономный привод.

В ячейке применяется шестикоординатный робот Fanuc M20iB/35S грузоподъемностью 35 кг, повторяемостью позиционирования  $\pm 0,02$  мм. Ячейка широкоуниверсальная, благодаря наличию отдельных обрабатывающих и измерительных модулей, функционирующих автономно и интегрированных в систему.

## **Информационное обеспечение процесса. Измерительные системы**

Информационное обеспечение процесса автоматизированной адаптивной полировки лопатки и возможности измерительных средств в значительной степени определяют работоспособность системы и в конечном итоге выходные показатели лопаток. Основные требования, которым должны отвечать измерительные системы (ИС):

- совместимость с системами измерения, применяемыми на предприятии для контроля лопаток;

- средства контроля должны быть сертифицированы в РФ;

- средства контроля должны осуществлять контроль острых кромок, в перспективе радиусом менее 0,1 мм, а также эллиптических кромок;

- при измерении спинки и корыта пера средства контроля должны выдавать облако точек для построения поверхности;

- для технологических задач необходимо получение информации по сечениям пера, поскольку траектория, сила резания и вектор движения шлифовального инструмента рассчитываются и задаются по сечениям.

В роботизированных ячейках нашли применение два типа средств контроля:

- специализированные контрольно-измерительные машины бесконтактного типа. Они контролируют поверх-

ность лопатки по сечениям, а некоторые позволяют оперативно получить интегральную и дифференцированную информацию о всех поверхностях лопатки;

- узкоспециализированные средства типа оптических лазерных датчиков-интерферометров. Данный метод является достаточным для контроля кромки, также возможно его ограниченное применение для контроля спинки пера. Затруднительно применение для поверхности корыта и переходных частей. Практически всегда требуется оптимизация угла сканирования по отношению к вогнутой и выпуклой поверхности пера, что неосуществимо при жесткой компоновке одновременной установкой нескольких сенсоров на раме. При сканировании широкозахватными сенсорами погрешность в точке может достигать  $\pm 0,04$  мм.

Бесконтактные широкоуниверсальные оптические системы-сканеры типа ATOS позволяют получить интегральную информацию об участке поверхности и построить по облаку точек поверхность лопатки. Для технологических задач получаемый с помощью данных средств объем информации избыточен. В то же время производительность систем типа ATOS в сравнении со специализированными средствами ниже, а требования к условиям применения существенно выше: требуется матирование полированной поверхности, необходимо маркировать измеряемые поверхности, затруднен контроль острых кромок, требуется применение различных объективов.

Автоматизация данных процессов крайне затруднительна. В роботизированной ячейке это неприемлемо.

В ячейке AV&R в позиции контроля с помощью двух лазерных датчиков Keyence LJ-V7100 осуществляется измерение лазерным методом профиля кромок по нескольким сечениям перед шлифованием и окончательный контроль профиля кромки после шлифования. Время измерения сечения кромки составляет 5...8 с.

В комплексе Arcos [11] ИС контролирует кромку, спинку и корыто методом лазерной триангуляции, с использованием стандартных лазерных датчиков. Четыре лазерных датчика расположены под углом  $90^\circ$  в плоскости перпендикулярной оси лопатки для одновременного измерения полного сечения (рис. 3). Робот подводит лопатку в зону измерений и фиксирует ее в положении контроля. Датчики измерительной системы перемещаются приводом вдоль оси лопатки, и производятся необходимые дискретные измерения сечений. Время измерения десяти сечений лопатки не превышает 20 с. Точность измерения составляет  $\pm 10$  мкм, повторяемость результатов измерений по линейному размеру составляет  $\pm 2,5$  мкм.

В ячейке фирмы Flexmill применяется система с четырьмя измерительными датчиками. Компоновка системы аналогична решению ИС Arcos. В дополнение к этой позиции система способна измерять кромки

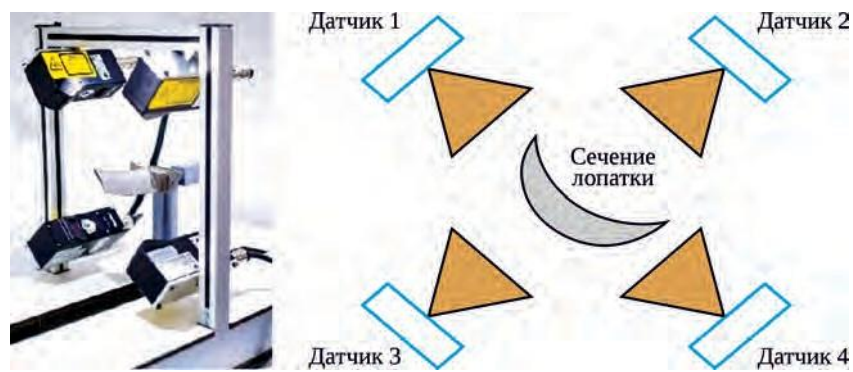


Рис. 3. Измерительная система и схема контроля лопатки в роботизированной ячейке Arcos [11]

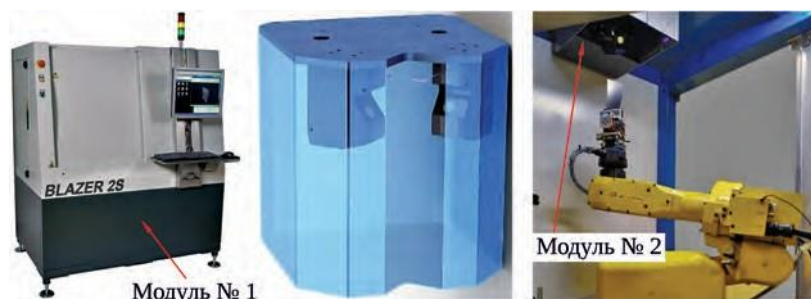


Рис. 4. Бесконтактная измерительная система RoboMate [12]

методом, который использован в технологическом решении контроля кромки в ячейке AV&R.

ИС ячейки RoboMate (рис. 4) состоит из двух модулей, которые выполняют в автоматическом режиме высокоскоростное точное сканирование кромки (радиусом от 0,035 мм), спинки и корыта пера лопатки; сравнение реальных кривых с номинальными данными математической 3D-модели.

Модуль № 1 представляет собой специализированную лазерную измерительную систему Blazer 2S, предназначенную для полного сканирования пера перед обработкой, оперативного контроля геометрии профиля пера в заданных сечениях с точностью в пределах 8 мкм, повторяемостью не более 1 мкм по осям и не более 2,5 мкм по линейному размеру. Модуль № 1 имеет автономный, программно управляемый механизм перемещений. Модуль № 2 представляет собой систему из двух фиксированных сенсоров 2D-сканирования, предназначенных для динамического контроля кромок в ходе процесса адаптивной обработки с точностью измерений в пределах 10 мкм и повторяемостью до 2,5 мкм. Результаты контроля передаются по линии обратной связи для определения припуска, коррекции траектории при адаптивном шлифовании кромок, спинки и корыта лопатки.

### Анализ измерительных систем

К числу недостатков ИС AV&R относятся следующие:

- отсутствует система контроля спинки и корыта пера, переходных частей и, соответственно, величины

припуска под шлифование, который формируется после фрезерования спинки и корыта лопатки;

- отсутствует возможность адаптивной обработки спинки и корыта пера, переходных частей.

В ячейке RFC-20 фирмы Fastems осуществляется адаптивная обработка кромок по результатам контроля до и после обработки. Отсутствует возможность адаптивной обработки спинки и корыта пера, переходных частей.

К числу недостатков ячейки Arcos следует отнести низкую жесткость конструкции ИС. Очевидной является необходимость применения в ИС программных и технических средств, компенсирующих погрешность перемещения по направляющим рамки с датчиками, погрешность температурных колебаний в системе. При заявленной выше точности эти суммарные погрешности при контроле пера значительны и могут достигать  $\pm 0,05$  мм.

В ячейке RoboMate используется ИС со специальными датчиками контроля лопатки более высокого информативного уровня. Выходными данными ИС являются параметры спинки, корыта и кромки, измеренные с погрешностью до 0,01 мм. Выходными данными ИС, в которой используются типовые сенсоры 2D (в ячейках AV&R, Arcos, Flexmill), являются параметры профиля пера, измеренные с погрешностью до 0,04 мм.

При допуске обработки 0,06 мм, точность сенсора не должна превышать 25% от допуска и не должна составлять более 0,015 мм. При использовании решения, предложенного в ИС RoboMate, заданный критерий

---

выполняется, в то время как при использовании систем, оснащенных типовыми сенсорами 2D, данный критерий практически недостижим.

Система Blazer 2S соизмерима по точности и повторяемости измерений с координатно-измерительной машиной, используемой при контактном методе контроля, при этом обладает более высоким разрешением — до 80 точек/мм. Следует отметить скорость сканирования, которая составляет, по данным [13], около 10 с/сечение, в то время как стандартная координатно-измерительная машина выполняет эту задачу не менее чем за 45 с, что важно для адаптивного управления процессом. Система Blazer 2S включена в госреестр систем измерения РФ, и полученные данные могут использоваться в качестве конечных показателей контроля.

### **Технологические параметры и модель адаптивного управления процессом**

К основным параметрам адаптивного управления процессом обработки относятся: траектория перемещения робота и координаты поверхности обрабатываемой детали, координаты положения режущей кромки инструмента, сила резания, максимально допустимая величина снимаемого материала за проход, скорость подачи и скорость резания. В ряде процессов достаточно применения базовых решений адаптивного управления, для роботизированного размерного шлифования лопатки требуется более сложная модель. Это связано с тем, что автоматическая система должна одновременно адаптироваться к нескольким возмущающим факторам, таким как неравномерность припуска, искривление лопатки. Помимо коррекции траектории перемещения и положения режущей кромки инструмента, режущей способности круга, необходима компенсация погрешности установки лопатки, погрешностей перемещения робота, изменения припуска и свойств обрабатываемого материала. Для этого в системе используется адаптивный контур с силовой обратной связью, который регулирует положение конечного элемента робота в соответствии с измеренными значениями силы резания или момента. Для эффективного решения необходимо объединение нескольких адаптивных технологий [14]. В результате измерения и анализа характеристик заготовки осуществляется расчет параметров шлифования в режиме реального времени. Промежуточный контроль позволяет адаптировать величину съема материала, удаляемого в соответствии с допуском на размер.

В ячейке AV&R реализован контроль положения поверхности лопатки методом касания к калибровочному шару. Косвенный контроль диаметра инструмента

осуществляется путем измерения положения кромки алмазного правящего ролика. С учетом измеренных данных происходит автоматическая компенсация износа инструмента и поддержание заданной скорости коррекцией числа оборотов круга. Возможен контроль тангенциальной составляющей силы резания путем контроля величины мощности привода. Подналадка процесса для компенсации воздействия факторов осуществляется путем контроля давления инструмента на лопатку. Для этого в схвате робота применяется трехкоординатный моментный датчик, связанный с системой числового программного управления робота.

В роботизированной ячейке RoboMate процесс обработки напрямую связан с процессом контроля геометрии. С помощью измерительной системы Blazer 2S (модуль № 1) осуществляется верификация установки лопатки в схвате. Система Blazer трансформирует координаты отсканированных точек поверхностей лопатки в систему координат робота. Осуществляется сравнение цифровой модели заготовки с номинальной цифровой моделью детали, припасовка заготовки к номинальной модели по технологии best-fit и вычисление фактического припуска в каждой точке. Таким образом, точность профиля пера лопатки обеспечивается данными измерений до обработки в модуле № 1, по которым производится адаптивное управление координатами перемещения лопатки.

По результатам измерений и расчета реального припуска на спинке, корыте и на кромках программное обеспечение (ПО) вычисляет усилия в точке контакта инструмента и заготовки, величину подачи и скорости резания для заданных точек траектории движения инструмента. На основании полученных данных система адаптивного управления осуществляет управление радиальной составляющей силы резания ( $P_y$ ) (усилие прижима схвата робота), которая напрямую влияет на образование прижогов при шлифовании [15]. Контроль силы резания датчиком давления позволяет регулировать в режиме реального времени составляющую силы резания  $P_y$  и компенсировать ее рост вследствие износа зерен круга.

Управление числом оборотов абразивного круга и скоростью резания осуществляется на основании расчетных данных алгоритма и путем компенсации износа круга при правке.

Точность профиля кромок обеспечивается данными измерений до и после обработки кромок в модуле № 2. Производится анализ и преобразование полученных данных в траекторию обработки кромок, включая определение усилия резания, угла подхода инструмента, скорости резания, количества итераций и т.д.

## Разработка программно управляемой технологии адаптивной размерной полировки

Конечный элемент робота (схват) движется по программируемой траектории относительно начала координат, центры координат остальных модулей системы неподвижны. Основные этапы разработки технологии для рассмотренных ячеек в принципе одинаковы. В ячейке AV&R это: подготовка моделей лопатки (построение, разбивка на зоны, сечения) с помощью универсального ПО NX; привязка всех рабочих элементов, которые устанавливаются на фланец робота, включая лопатку; создание траекторий с помощью универсального ПО Mastercam; проверка траекторий робота в ПО Robotmaster.

Возможно автоматическое обучение системы по данным САД-модели, которое реализуется с помощью ПО AV&R. Отладка параметров производится при помощи специализированного ПО BrainWave. В результате осуществляется программируемое позиционирование и движение лопатки в пространстве в соответствии с заданными параметрами.

Практический опыт разработки программ показал, что 50% времени затрачивается на программирование и 50% непосредственно на отладку, доводку и проверку на рабочем месте. Трудоемкость разработки программы для новой лопатки, по опытным данным, составляет не менее недели. К числу недостатков ПО AV&R относятся: жесткая, не предусматривающая редакции методика программирования, в том числе в измерительной позиции; сложное программирование ячейки AV&R для нескольких позиций обработки/контроля лопатки, расположенных на разных уровнях (см. рис. 1).

Основные переходы операции роботизированной полировки поверхности лопатки и применяемый инструмент приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Табл. 2. Переходы операции роботизированной полировки

Операция	Инструмент	Проход
Захват лопатки роботом	–	–
<i>Шлифование переходных частей</i>		
Установка абразивного круга из магазина инструментов в шпиндель	–	–
Калибровка и правка абразивного круга алмазным роликом	–	–
Шлифование поверхности сопряжения пера и нижней полки со стороны спинки	Абразивный круг № 1	Черновой проход – 1
Замена абразивного круга № 1 на абразивный круг № 2	Абразивный круг № 2	–
Шлифование поверхности сопряжения пера и нижней полки со стороны спинки		Получистовой проход – 1 Чистовой проход – 1
<i>Шлифование кромок</i>		
Замер входной и выходной кромки	Абразивный круг	–
Калибровка и правка абразивного круга алмазным роликом		–
Шлифование входной кромки		1
Шлифование выходной кромки		1
Измерение входной кромки		–
Шлифование входной кромки		1

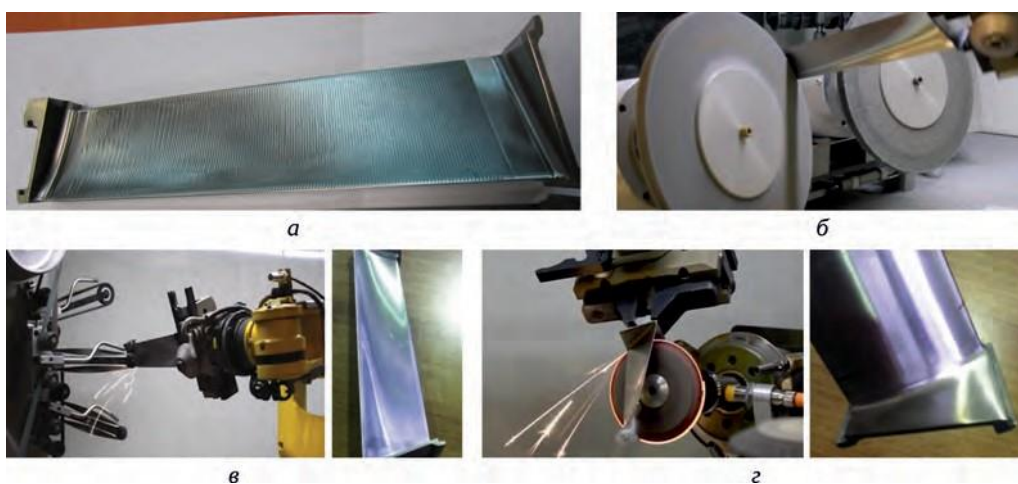


Рис. 5. Переходы обработки поверхностей лопатки, применяемый инструмент и внешний вид шлифованной поверхности: а – перо лопатки после фрезерования; б – обработка кромок, снятие заусениц, формирование радиусов и фасок на кромке; в – неадаптивное ленточное шлифование спинки и корыта пера; г – неадаптивное шлифование абразивным кругом переходных частей

В ячейке AV&R осуществляется адаптивное шлифование кромок (рис. 5,б), неадаптивная обработка спинки и корыта пера (рис. 5,в), неадаптивное шлифование переходных частей лопатки (рис. 5,з) с использованием четырех типов кругов разной зернистости.

В ячейке RoboMate используется специализированное ПО MARS, с помощью которого на всех этапах процесса шлифования решаются задачи:

- контроля/сканирования геометрии объекта до, в процессе и после обработки;
- преобразования результатов сканирования в параметрические данные для управления роботом (координаты, вектор движения, усилие, подача и т.д.);
- передачи данных в реальном времени компонентам ячейки;
- обработки лопаток с нестабильным и неравномерным распределением припуска, а также с наличием

локальных технологических выступов/прибылей (особенно актуально для лопаток турбины).

Данные передаются в ПО Simplicity, посредством которого формируются команды роботу, производится полный мониторинг процессов обработки, определяются базы робота и выполняется оптимизация схемы движений. С помощью ПО Simplicity определяются основные параметры процесса, включая допустимое оптимальное усилие резания, углы подхода к инструменту, скорость резания/число оборотов вращения инструмента, количество итераций, контролируется износ инструмента, статус процессов, система безопасности ячейки.

ПО Simplicity позволяет создавать новые управляющие программы и выполнять отладку уже существующих управляющих программ. ПО Roboguide компании Fanuc используется для подготовки управляющей прог-

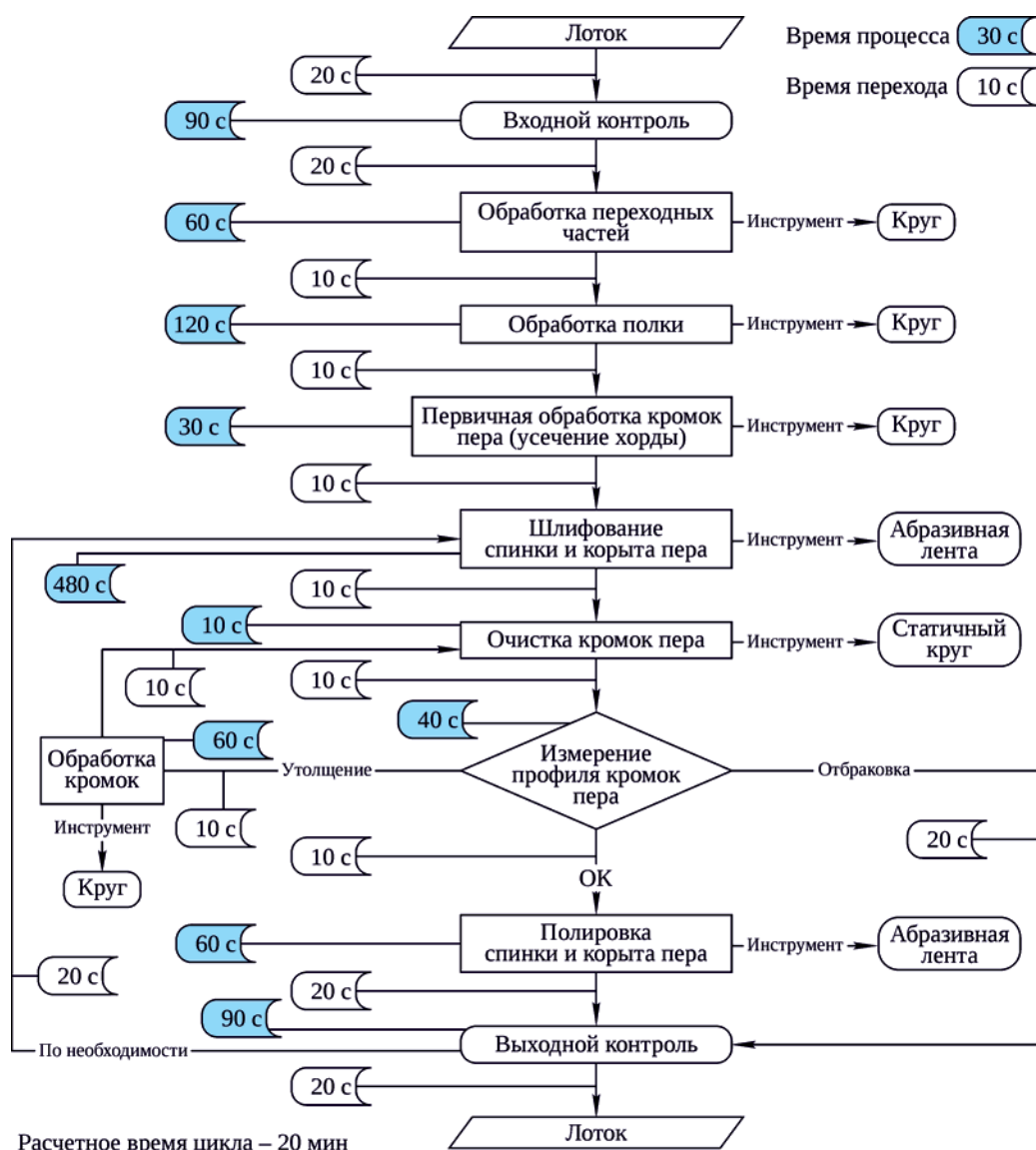
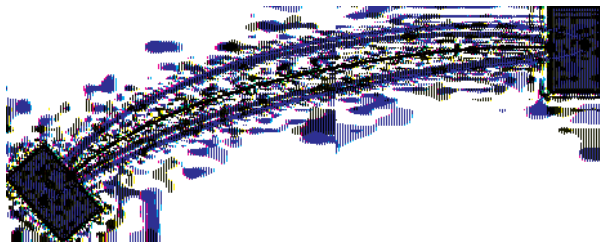


Рис. 6. Алгоритм работы роботизированной ячейки RoboMate





**Рис. 7.** Схема шлифования кромок (усечения хорды) в размер номинальной хорды. Номинальный профиль (красный цвет) и актуальный профиль с припуском (зеленый цвет)

раммы на этапе симуляции процессов движения робота и при переходе по базам. Процесс симуляции необходим для оптимизации движений робота и для определения проблемных позиций, положений при обработке. Применение вышеуказанного специализированного ПО существенно снижает трудоемкость программирования и повышает эффективность адаптивного управления процессом в сравнении с универсальным ПО Mastercam и NX.

Разработка программы измерения и обработки в ячейке RoboMate для лопатки нового типа занимает, по данным фирмы [12], от 1 до 2 ч, благодаря наличию специализированного интерфейса, который позволяет полностью контролировать и отслеживать процесс в режиме онлайн. Время наладки и переналадки системы оказывает значительное влияние на эффективность применения ячейки. Алгоритм работы ячейки RoboMate и длительность основных переходов процесса контроля и адаптивной обработки приведены на рис. 6.

В измерительном модуле № 1 производится измерение параметров лопатки: хорды, толщины профиля (толщины входной ( $C_1$ ) и выходной ( $C_2$ ) кромок, максимальной толщины профиля ( $C_{max}$ )). Система анализирует результаты измерения хорды: если в одном или более сечениях измеренная хорда меньше установленного критического минимума, лопатка считается непригодной для обработки на комплексе и возвращается с помощью робота на свою позицию в лотке. Если хорда превышает допуск (стандартное состояние), система принимает решение об оптимизации снятия припуска со стороны входной и выходной кромок, пользуясь спе-

циальным алгоритмом. По итогам измерений выполняется шлифование кромок (усечение хорды) в размер номинальной хорды (рис. 7).

Аналогично система анализирует результаты измерения толщины профиля: если хотя бы одна толщина меньше установленного критического минимума, лопатка считается непригодной для обработки на комплексе и возвращается с помощью робота на свою позицию в палете. Система анализирует припуск по профилю пера и определяет допустимые значения силы резания по координатам профиля. Выполняется адаптивное шлифование профиля пера в размер в соответствии с рассчитанной функцией изменения силы резания. При помощи профильного круга производится обработка поверхности сопряжения пера и полки.

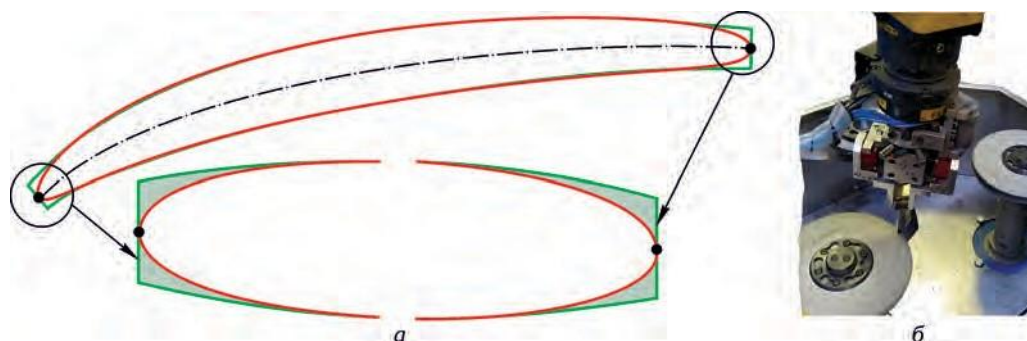
На следующем переходе производится измерение кромок пера в модуле № 2 и выполняется адаптивная обработка кромок в размер (рис. 8). Система производит измерение кромок после обработки, и в случае необходимости производится шлифование кромки в размер. Согласно вышеизложенному алгоритму возможно методом 1...2 итераций «контроль – обработка – контроль» обеспечить требуемую точность обработки радиусного профиля кромки 0,025 мм.

## Основные практические результаты

В процессе экспериментов и шлифования при производстве лопаток контролировались показатели шероховатости поверхности, точность профиля, машинное время обработки, стойкость инструментов.

Припуск на лопатках составляет в среднем 0,07 мм и удаляется по схеме: 0,05 мм – на черновой операции; 0,02 мм – на получистовой; 0 – на чистовой с выходящими проходами. Количество проходов для снятия припуска определяется предварительно расчетным путем и корректируется на основании данных измерения кромок до и после обработки.

Выбор типа и марки абразивного инструмента осуществляется на основании требований к геометрии и качеству поверхности, выбор марки материала лопатки –



**Рис. 8.** Схема шлифования кромок (а) и шлифовальный модуль (б). Номинальный профиль (красный цвет) и актуальный профиль (зеленый цвет)

на основе эмпирических данных о съеме материала. При шлифовании пера на черновых проходах используется абразивная лента с прерывистой рабочей поверхностью марки Trizact CR337DC. Абразивные инструменты с прерывистой рабочей поверхностью имеют более высокую режущую способность. При ленточном шлифовании лопаток из титанового сплава VT8 температура в зоне контакта, как известно [16], достигает 700°C и выше. Процесс снятия припуска прерывистой лентой осуществляется с лучшими условиями стружкообразования благодаря прерыванию процесса резания. Это снижает среднюю температуру на поверхности, теплонпряженность и уменьшает вероятность структурных и фазовых превращений в материале. Прерывистая лента не подвержена засаливанию, в результате стойкость ее выше (40...45 лопаток). Для полустойких и чистовых проходов используется лента со сплошной рабочей поверхностью для обеспечения требуемой шероховатости. Стойкость ленты на полустойких проходах составляет 40 лопаток, на чистовых – 25 лопаток, так как поверхность ленты засаливается. Ширина ленты влияет на производительность и стойкость. Например, в ячейке Argos ширина лент больше (100...150 мм), что может обеспечить более высокую производительность и стойкость инструмента.

Круги для кромок работают в режиме круглого периферийного шлифования и имеют более длительную стойкость. Круги для шлифования полки и переходной части имеют стойкость 10...12 лопаток, изнашиваются быстрее, так как работают в режиме профильного шлифования и требуют постоянной периодической правки для обеспечения требуемого радиуса.

Технология размерной полировки в ячейке AV&R позволяет обрабатывать профиль входной и выходной кромки абразивным кругом на керамической связке с точностью  $\pm 0,0375$  мм путем итераций по схеме «измерение – шлифование – измерение». Достижимая точность профиля пера составляет  $\pm 0,06$  мм, шероховатость поверхности –  $Ra = 0,2...0,4$  мкм в зависимости от режимов. Время обработки в ячейке AV&R лопатки длиной 200 мм составляет в среднем около 40 мин.

Достижимая точность и время обработки сильно зависят от точности и качества поверхностей, получаемых после обработки на предыдущей операции, жесткости всех звеньев робота и ленточного шлифовального устройства. В приведенном фирмой AV&R примере [9] время обработки кромок компрессорной лопатки длиной 150 мм с допуском на радиус  $\pm 37$  мкм составляет 3 мин, время обработки переходных частей – 2 мин. Достигается шероховатость поверхностей  $Ra = 0,4...0,8$  мкм. Для получения таких показателей припуск должен составлять не более 0,1 мм после предварительной обработки поверхностей лопатки

фрезерованием. Практическое применение ячейки и полученные результаты показали, что увеличение припуска и особенно его неравномерность по профилю значительно увеличивают время обработки из-за роста количества итераций для достижения требуемой точности. Сказывается наследственность погрешностей, сформированная на предварительных операциях вследствие недостаточной жесткости системы. Рост неравномерности припуска по перу до 0,3 мм приводит к резкому увеличению времени роботизированной шлифовки лопатки длиной 230 мм. Для обеспечения точности обработки профиля пера с допусками  $\Delta C_{\max} = -0,16$  мм,  $\Delta C_1 = \Delta C_2 = \pm 0,06$  мм,  $\Delta R = \pm 0,2$  мм требуется более 90 мин. Это существенно больше времени ручной полировки, и при высокой стоимости комплекса его применение становится нерентабельным.

Существенное влияние на процесс оказывают показатели жесткости системы в целом и собственно робота. Применяемый в ячейке AV&R робот имеет при грузоподъемности 7 кг момент силы 11,9 Нм и явно недостаточную жесткость. Это существенно влияет на производительность обработки при неравномерном припуске. Применяемый в ячейке RoboMate робот имеет грузоподъемность 35 кг, момент 35...40 Нм и обладает большей жесткостью, соответственно достигается более высокая производительность обработки.

В ячейке RoboMate при обработке лопаток высотой 200 мм с хордой 70 мм время полного цикла, включающее входной/выходной контроль, полную адаптивную обработку спинки и корыта пера, кромок, полки и переходной части, составляет 20...25 мин. Точность обработки кромок, спинки и корыта – не более 0,025 мм, точность выходного контроля – не более 0,01 мм.

Стабильность размеров и величина припуска под размерную полировку в партии лопаток существенно влияют на экономические и качественные показатели процесса. В случае если колебание припуска превышает 150...200 мкм, эффективность автоматизированной полировки в ячейке AV&R резко снижается. Целесообразным является обеспечение правильного профиля и макрорельефа поверхности лопатки на предварительных операциях фрезерования с последующим формированием микрорельефа и шероховатости на операции роботизированной полировки со снятием припуска в 50...70 мкм.

При значительных отклонениях размеров и колебаниях припуска лопаток после предварительной обработки целесообразно в ряде случаев применять метод селективного подбора лопаток под роботизированную полировку. Для серийного производства важно обеспечить постоянную загрузку системы обработки и минимизировать внесение изменений в программу. В случае если припуски существенно отличаются друг от друга

(более 0,1 мм), желательна провести предварительную сортировку по группам и осуществлять процесс в такой последовательности:

- контроль по реперным сечениям в измерительной системе;
- сортировка лопаток на группы по величине припуска под полировку;
- выбор подпрограммы согласно определенному припуску.

Проведение предварительной сортировки целесообразно для ячейки с ИС, имеющей погрешность контроля соизмеримую с допуском на размер. В случае применения ИС с погрешностью измерения, не превышающей 25% поля допуска, предварительный контроль и сортировка не требуются, оптимизация программы обработки для снятия припуска осуществляется системой адаптивного контроля ячейки.

## Заключение

Проведен анализ технологических методов и типов оборудования для автоматизированной адаптивной размерной полировки поверхностей лопаток ГТД.

Сформулированы свойства ячеек роботизированной полировки, требования к ним и дан анализ их измерительных систем.

Применение специализированной бесконтактной координатно-измерительной машины, интегрированной в ячейку, совместно с узкоспециализированными лазерными интерферометрами существенно повышает техно-

логические возможности адаптивной размерной полировки.

Рассмотрена модель программирования и алгоритмы операций роботизированной адаптивной размерной полировки.

Система RoboMate требует на порядок меньшего времени при переналадке на новую деталь (15...30 мин вместо 0,5...1 смены), что существенно влияет на показатели эффективности в условиях мелкосерийного производства.

Применение роботизированной адаптивной размерной полировки лопаток заменяет нестабильный, трудоемкий, экологически вредный процесс ручной полировки и позволяет:

- обеспечить качественный, детерминированный процесс шлифования всех поверхностей лопаток, в том числе кромок с радиусом до 0,1 мм и эллиптической формой;
- снизить шероховатость шлифованной поверхности в 1,5...2 раза;
- повысить стабильность процесса и минимизировать отклонения от требований по точности и качеству обработки.

Значительное влияние на эффективность роботизированной размерной полировки оказывает неравномерность припуска после предварительной обработки. Существенное влияние на процесс оказывают показатели жесткости системы и применяемого робота.

Даны рекомендации по оптимизации технологических процессов.

## Литература

1. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / Братухин А.Г., Решетников Ю.Е., Иноземцев А.А. и др. ; под ред. А.Г. Братухина и др. М. : Авиатехинформ, 1999. 554 с.
2. Мубаракшин Р.М. Оптимизация вариантов технологий и методов шлифования лопаток газотурбинных двигателей // Технология машиностроения. 2018. № 2. С. 10–19.
3. The Engine Yearbook : Aircraft Technology's annual publication for the aero-engine professional. 2013. P. 68–71.
4. Goodhand M.N., Miller R.J. Compressor leading edge spikes: a new performance criterion // Journal of Turbomachinery. 2011. Vol. 133, iss. 2. Art. 021006.
5. Goodhand M.N. Compressor leading edge : a dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Christ's College, Whittle Laboratory, Cambridge University Engineering Department, 2010. vii, 151 p.
6. ГОСТ 23537-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1979. 30 с.
7. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. М. : Машиностроение, 2006. 256 с. (Библиотека технолога).
8. Westkämper E., Löffler C. Strategien der Produktion : Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Springer Vieweg, 2016. XIII, 309 s.
9. Profiling leading and trailing edges and polishing airfoil on blades and vanes / AV&R. Preprint. 2015.
10. Автоматизация механических производств : каталог / Fastems. 2016. 32 с.
11. Роботизированные комплексы финишной обработки от лаборатории новых технологий : проспект / Argos. 2018. 13 с.
12. Системы адаптивного шлифования RoboMate : проспект / MTL. 2019. 15 с.

- 
13. Apparatus and method for optically measuring an object surface contour : United States patent 6094269 / Sh. Ben-Dove, M. Fridhender, K. Yam et al ; assignee: Metroptic Technologies. Date of patent 25.07.2000 ; appl. No. 09/039342 ; filed 13.03.1998. 20 p.
  14. Мубаракшин Р.М., Мубаракшин М.Р., Сотников П.С. Адаптивное управление и автоматизация процессов обработки деталей с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей ответственных узлов и машин в производстве 4.0 // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 3–10.
  15. Мубаракшин Р.М. Управление режущей способностью и износостойкостью абразивного инструмента методом пропитки // *Вестник машиностроения*. 1991. № 5. С. 21–27.
  16. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. Киев : Вища школа, 1986. 176 с.

## References

1. Bratukhin A.G., Reshetnikov Iu.E., Inozemtsev A.A. et al. Designing and manufacturing gas turbine engines for airliners. Edited by A.G. Bratukhin et al. Moscow: Aviatekhinform [Aviatechinform], 1999. 554 p.
2. Mubarakshin R.M. Optimization of option technologies and grinding methods of gas turbine engines blades. *Tekhnologiya mashinostroeniia* [Technology of mechanical engineering]. 2018. No. 2. P. 10–19.
3. The Engine Yearbook : Aircraft Technology's annual publication for the aero-engine professional. 2013. P. 68–71.
4. Goodhand M.N., Miller R.J. Compressor leading edge spikes: a new performance criterion // *Jornal of Turbomachinery*. 2011. Vol. 133, iss. 2. Art. 021006.
5. Goodhand M.N. Compressor leading edge : a dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Christ's College, Whittle Laboratory, Cambridge University Engineering Department, 2010. vii, 151 p.
6. GOST 23537-79. Lopatki aviatsionnykh osevykh kompressorov i turbin. Terminy i opredeleniia [State standard 23537-79. Blades of aviation axial compressors and turbines. Terminology and definitions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards], 1979. 30 p.
7. Poletaev V.A. Tekhnologiya avtomatizirovannogo proizvodstva lopatok gazoturbinnnykh dvigatelei [Technology of automated production of gas turbine engine blades]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 2006. 256 p. (Biblioteka tekhnologa [Technologist's Library]).
8. Westkämper E., Löffler C. Strategies of production: technologies, concepts and ways in practice. Springer Vieweg, 2016. XIII, 309 p.
9. Profiling leading and trailing edges and polishing airfoil on blades and vanes / AV&R. Preprint. 2015.
10. Fastems factory automation systems : catalogue. 2016. 32 p.
11. Robotizirovannye komplekсы finishnoi obrabotki ot laboratorii novykh tekhnologii [Robotic finishing complexes from laboratory of new technologies] : prospect [prospectus]. Arcos. 2018. 13 p.
12. Sistemy adaptivnogo shlifovaniia [Adaptive grinding systems] : prospect [prospectus]. MTL. 2019. 15 p.
13. Apparatus and method for optically measuring an object surface contour : United States patent 6094269 / Sh. Ben-Dove, M. Fridhender, K. Yam et al ; assignee: Metroptic Technologies. Date of patent 25.07.2000 ; appl. No. 09/039342 ; filed 13.03.1998. 20 p.
14. Mubarakshin R.M., Mubarakshin M.R., Sotnikov P.S. Adaptive control and automation of the workpiece machining processes in order to provide required performance of critical components and machines in the Industry 4.0 production. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies]. 2019. No. 4 (57). P. 3–10.
15. Mubarakshin R.M. Upravlenie rezhushchei sposobnost'iu i iznosostoykost'iu abrazivnogo instrumenta metodom propitki [Controlling cutting ability and wear resistance of abrasive tools by impregnation method]. *Vestnik mashinostroeniia* [Journal "Vestnik Mashinostroeniya"]. 1991. No. 5. P. 21–27.
16. Iakimov A.V. Preryvistoe shlifovanie [Intermittent grinding]. Kiev: Vishcha shkola publ., 1986. 176 p.