

следующих редакциях:

*Базирование* – придание предмету требуемого положения относительно заданной системы координат.

*База* – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей или элементы симметрии (точка на линии, центр на плоскости, центр в пространстве, линия, плоскость, ось) принадлежащие предмету и используемые для базирования.

*Скрытая база* – элемент симметрии: точка на линии, центр на плоскости, центр в пространстве, линия, плоскость, ось.

5. Включить в правило базирования – «базирование предмета должно начинаться с базы, обеспечивающей устойчивое положение предмета под действием собственного веса».

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 21495 – 76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 11с.

2. Балакшин, Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. В 2-х т. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1982. 367 с.

3. Базров, Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. – М.: Машиностроение, Ленинградское отделение. 1985. – 496 с.

4. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения учебник для ВУЗов. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 736 с.

### REFERENCES

1. RSS 21495 – 76. *Basing and Bases in Mechanical Engineering. Terms and Statements.* – M.: Publishing House of Standards, 1981. – pp. 11.

2. Balakshin, B.S. *Theory and Practice of Mechanical Engineering.* In 2 Vol. т. Vol. 2. – M.: Mechanical Engineering, 1982. pp. 367.

3. Bazrov, B.M. *Machine Accuracy Computation by Computers.* – M.: Mechanical Engineering, Leningrad Section. 1985. – pp. 496.

4. Bazrov, B.M. *Fundamentals of Engineering Technique: textbook for colleges.* 2-d Ed. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 736.

Рецензент д.т.н. В.Г. Митрофанов

УДК 621.923

DOI: 10.12737/22576

В.А. Полетаев, д.т.н.,  
(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный  
технический университет имени П.А. Соловьева»  
Ярославская область, 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53)

Е.В. Цветков, к.т.н.,  
(НПО «Сатурн»  
Ярославская область, 152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, д. 163)  
E-mail: poletaev@rsatu.ru, egor.tsvetkov@npo-saturn.rum

## Сравнительный анализ автоматизированного и неавтоматизированного производства лопаток турбин

*Представлен производственный опыт по созданию полностью автоматизированного участка изготовления лопаток турбин ГТД. Описаны преимущества автоматизированного производства, принципы построения, приведены примеры конкретной реализации автоматизированных производственных мощностей.*

**Ключевые слова:** лопатки турбины; автоматизированные технологии; принципы автоматизации; эффективность автоматизированного производства.

V.A. Poletaev, D.Eng.,  
(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk",  
53, Pushkin Str, Rybinsk, Yaroslavl region 152934),

E.V. Tsvetkov, Can.Eng.  
(Scientific Production Association "Saturn", 163, Lenin Avenue, Rybinsk, Yaroslavl region, 152903)

## Comparative analysis of automated and non-automated production of turbine blades

*Existing production of turbine blades is arranged on the principle "one machine – one part – one product". This concept does not meet the requirements of today to ensure the required "price – quality" ratio of the product. The only solution to improve the efficient production to process turbine blades on the base of multifunctional machining centers allows increasing efficiency of turbine blade manufacture, and provides advantages to manufacturers of GTE on the gas turbine markets. Automated production of the turbine blades developed by NPO "Saturn" has greatly enhanced the quality of GTE blade wheel manufacture and reduced the cost of their production.*

**Keywords:** turbine blades; automated techniques; automation principles; automated production efficiency.

Автоматизированные технологические процессы комплексной обработки наружного контура лопаток ГТД методами высокоскоростного глубинного шлифования являются наиболее современными процессами изготовления деталей газовых турбин для авиационного, аэрокосмического и энергетического машиностроения [1, 2].

Практический опыт их использования на НПО «Сатурн», а также опыт передовых компаний мира, а именно: Rolls Roys, GE, Snecma, MTU, Fiat, Mitsubishi Hevi, свидетельствует, что только комплексные, полностью автоматизированные технологические процессы обеспечивают получение лопаток ГТД с задаваемыми при проектировании соотношениями цена – качество. Автоматизированные технологические процессы, осуществляющие комплексную (замкнутую) обработку реализуются в технологическом потоке (линии) производства деталей, имеющих одинаковые конструктивные признаки и близкие типоразмеры. Технологические линии, реализующие ту или иную групповую технологию, объединены в центры компетенций, организованные по предметному принципу.

НПО «Сатурн» является первым в РФ предприятием, широко использующим технологии автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин. На предприятии создано специальное структурное подразделение – Центр компетенций по автоматизированной обработке лопаток турбин, в котором сосредоточено автоматизированное производство по изготовлению лопаток турбин для ГТД новых поколений, в том числе Sam-146, MC-21 и др. В рамках производства реализуется более пятидесяти комплексных, полностью автоматизированных процессов изготовления лопаток турбин.

Производственные мощности, реализующие автоматизированные технологические процессы созданы в дополнение к существующим мощностям производства лопаток турбин, организованных по предметному (позловому) принципу. Принятие решения по созданию автоматизированного производства, объединяющего несколько технологических потоков, организованных по технологическому принципу, в единый центр компетенций по производству лопаток турбин, осуществлялось на основе анализа существующего поточного производства.

Существующие мощности сложились на предыдущем этапе развития НПО «Сатурн» в период освоения и становления производства ГТД третьего поколения, а именно: газотурбинных двигателей ДЗКУ/КП.

Данное производство содержит несколько технологических потоков, содержащих металлорежущее оборудование, объединенное в поток на основе типовой (групповой) технологии, в том числе групповой технологии обработки рабочей (роторной) лопатки турбины и групповой технологии обработки сопловой (статорной) лопатки турбины.

Внутри каждого потока находятся участки с несколькими параллельными линиями однотипного оборудования, отличающегося друг от друга типоразмерами, т.е. предназначенного для обработки близких по конструкции деталей, но существенно разных типоразмеров.

В этих потоках используется технологическое оборудование с различной степенью автоматизации: от оборудования реализующего высокопроизводительные, автоматизированные процессы обработки до оборудования универсального, частично или полностью неавтоматизированного, выполняющего процессы обработки в ручном режиме. Такой подход

к построению технологического потока связан с содержанием технологической операции, т.е. ответственностью поверхностей детали, которые формируются на той или иной операции.

Как правило, автоматизированные процессы, осуществляемые на станках с ЧПУ, выполняются при обработке поверхностей, по которым деталь устанавливается в лопаточное колесо, т.е. при обработке хвостовиков. Все остальные поверхности, в том числе поверхности технологических баз выполняются на универсальных шлифовальных станках в ручном режиме. Такая организация производства соответствует принципу – «один станок – одна деталь – одно наименование двигателя».

Необходимость соблюдения данного принципа продиктовано реалиями существующего технологического оборудования, где процесс переналадки в сотни раз длиннее цикла механической обработки партии деталей. Для обеспечения требуемой точности эти станки оснащаются специальными наладками, т.е. специальными приспособлениями, предназначенными для конкретного наименования детали. В этом состоянии они пребывают длительное время, т.е. не перестраиваются под другое наименование.

В результате в потоке достаточно много простого и недорогого технологического оборудования, которое имеет малый коэффициент загрузки, занимает значительные производственные площади, плохо обслуживается. Производственные участки загромождены полуфабрикатами деталей, многочисленными станочными приспособлениями и контрольной оснасткой. Маршрут движения полуфабриката лопатки по такому технологическому потоку достаточно извилист, время «пролёживаемости» деталей на каждой технологической операции более чем значительно.

Существующую структуру производства лопаток условно можно классифицировать как «технологическую деревню», рис. 1.

Представленная условная структура производства лопаток иллюстрирует движение полуфабрикатов лопаток турбин в технологическом потоке. Детали перемещаются не только по вертикали, но и по горизонтали, попадают в другие технологические линии для выполнения отдельных, как правило, очень незначительных технологических операций, пролеживают там достаточно большое время, получают повреждения при транспортировке и т.д.

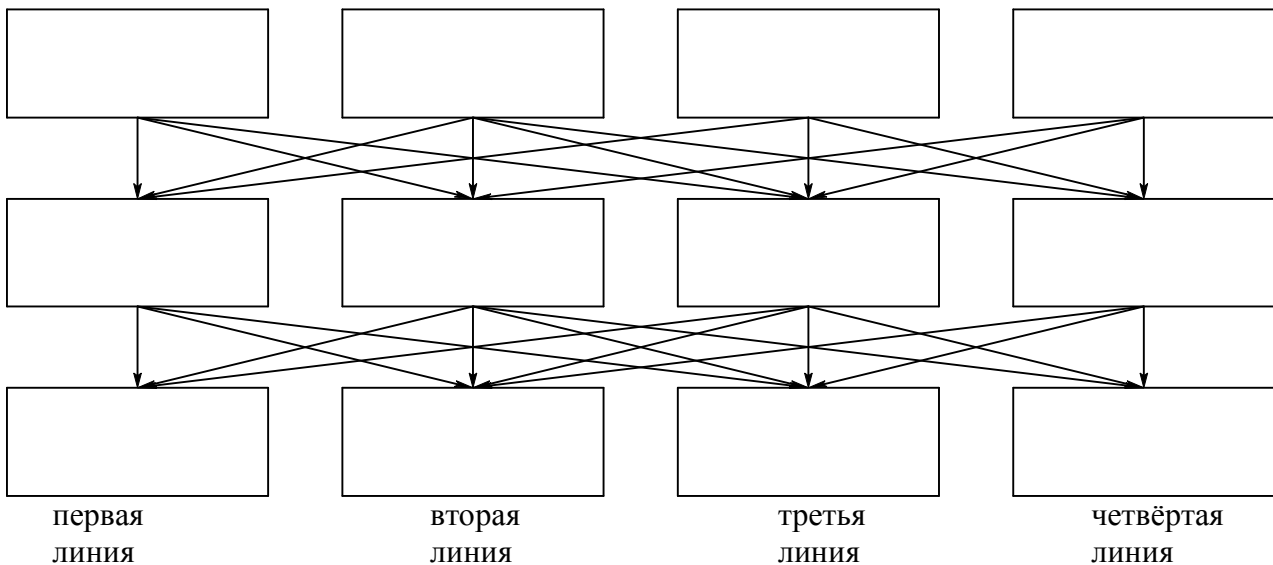


Рис. 1. Структура неавтоматизированного производства лопаток турбин

Но самым главным недостатком такого подхода является низкая геометрическая точность лопаток ГТД, обусловленная отклонениями взаимного расположения различных поверхностей лопаток турбин относительно друг друга. В результате этого при сборке лопаточных колес турбин приходится осуществлять постоянную доработку, заниматься подбором лопаток в колесо, осуществлять селективную сборку колес ротора и статора.

Целью этих доработок является обеспечение требуемых радиальных и осевых зазоров между ротором и статором, устранение торцевых и радиальных биений лопаточных колес, т.е. осуществлять целый комплекс технологических мероприятий для достижения требуемых характеристик ГТД. Все это значительно повышает себестоимость изготовления, делает изделие, произведенное в рамках данного производства неконкурентоспособными на рынке ГТД.

Автоматизированные технологические процессы лишены этих недостатков, позволяют вести комплексную обработку всех поверхностей наружного контура лопаток турбины. Данные технологии позволяют вести обработку практически всех поверхностей детали, составляющих ее наружный контур в одной системе координат, что исключает наличие отклонений взаимного расположения поверхностей, составляющих наружный контур детали.

Это позволяет при сборке лопаточных колес исключить их доработку в сборе, т.е. серьезно сократить затраты производства. При этом технологические потоки, каждый из которых реализует ту или иную групповую технологию, состоят исключительно из автоматизированного оборудования с ЧПУ, что позволяет весьма оперативно осуществлять переналадку оборудования. За счет этого организуется вертикальное перемещение полуфабрикатов детали в потоке, исключается их проникновение в параллельные технологические линии.

Структура автоматизированного производства приведена на рис. 2.

Важность выстраивания производственных линий в соответствии с групповым технологи-

ческим процессом сложно переоценить. Решение этой задачи естественным образом позволяет следующее: сократить количество рабочих мест; сократить производственный цикл обработки; высвободить производственные площади; повысить качество продукции; сузить компетенции персонала на конкретном технологическом переделе и т.д.

Наряду с преимуществами автоматизированного технологического производства необходимо отметить высокую стоимость технологического оборудования, используемого в технологических потоках реализации тех или иных групповых технологий, а также высокую стоимость обслуживания автоматизированных процессов.

Требуется оценка эффективности столь различных технологических подходов к организации производства лопаток ГТД. В связи с этим на НПО «Сатурн» при организации центра компетенций изготовления лопаток ГТД был проведен конкретный экономический расчет эффективности создаваемого производства. Расчет производился исходя из номенклатуры и объемов производства лопаток, количества внедренных автоматизированных групповых технологий, затрат по освоению производства.

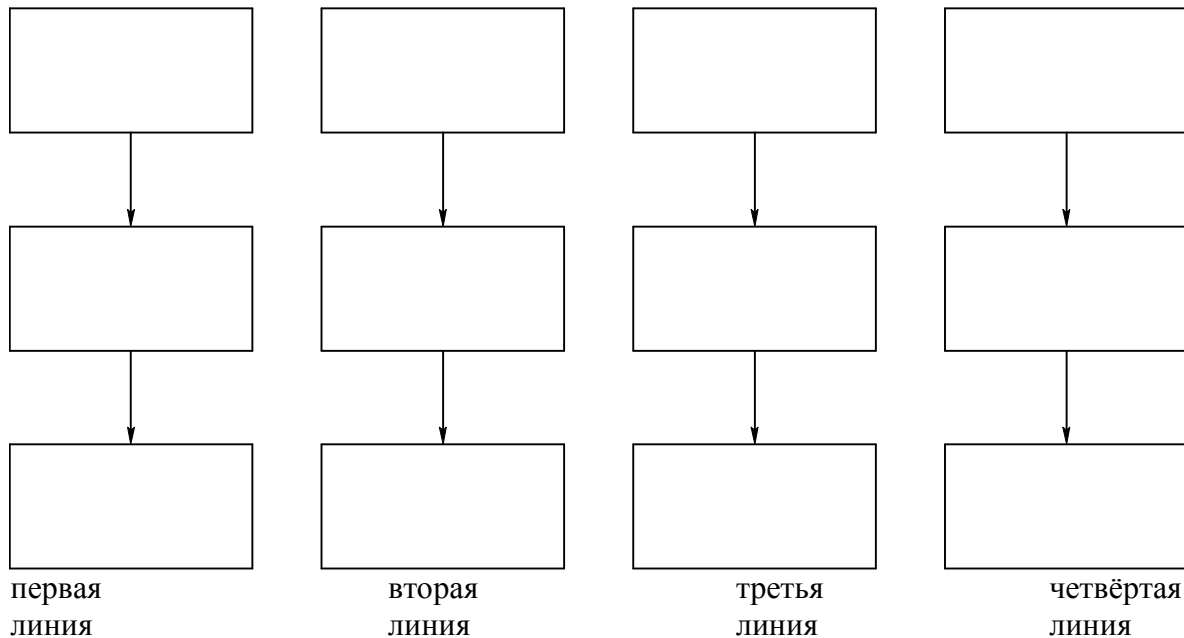


Рис. 2. Структура автоматизированного технологического потока

Условные сравнительные характеристики автоматизированной технологии комплексной обработки и существующих неавтоматизированных технологических процессов обработки наружного контура деталей ГТД приведены в табл. 1.

Сопоставление приведенных в таблице по-

казателей, определяющих затраты на осуществление сравниваемых технологических процессов, показывает неоспоримое преимущество автоматизированных технологических процессов комплексной обработки наружного контура деталей ГТД методами скоростного и глубинного шлифования.

Сравнительные характеристики автоматизированной и поточной технологий обработки лопаток турбин

№ п/п	Наименование показателя	Полностью автоматизированные технологии комплексной обработки	Неавтоматизированные технологические процессы
1	Количество операций в технологическом процессе	2...4	10...15
2	Количество переходов, выполняемых в каждой операции	4...8	1...2
3	Количество единиц шлифовального оборудования, используемого в реализации процесса	1...2	10...15
4	Количество рабочих мест основных производственных рабочих, участвующих в технологическом процессе (в условиях 2-х сменной работы)	2...4	15...20
5	Количество технологической рабочей оснастки, используемое для изготовления одного наименования лопаток	2...4	15...20
6	Количество контрольной оснастки, используемое для изготовления одного наименования лопаток	4...6	15...20
7	Способы обработки, реализуемые в технологическом процессе	Высокоскоростное шлифование кругами из СТМ; глубинное шлифование	Традиционное маятниковое шлифование и отчасти глубинное
8	Средняя установленная мощность технологического оборудования, задействованная при обработке детали одного наименования, кВт	50...60	200...300
9	Производственные площади, задействованные в технологическом процессе, м <sup>2</sup>	60...120	300...500
10	Средняя трудоемкость изготовления однотипных деталей ГТД, н/ч	0,5...1,0	8...12
11	Средняя стоимость одной единицы технологического оборудования для автоматизированной обработки лопаток турбин, млн. руб.	20...30	2,5...3
12	Стоимость приведенного станка/часа, руб.	1 500	3 000

Данные технологии по средствам своей реализации, технологическому обеспечению, количеству и качеству персонала, задействованному в производстве, кардинально отличаются друг от друга. Поэтому на НПО «Сатурн» выделили производство лопаток турбины в полностью автоматическом цикле в от-

дельный производственный участок, являющийся центром компетенций по производству лопаток турбин нового поколения ГТД.

Центр производственных компетенций (ЦПК) производства лопаток турбин, основанный на автоматизированной комплексной технологии обработки, соответствует следую-

щим содержательным признакам:

1. Производственные линии состоят из автоматизированного технологического оборудования в последовательности, отвечающей реализуемой в линии групповой технологии изготовления лопаток. Количество линий соответствует количеству групповых процессов, реализуемых в ЦПК.

2. Производство лопаток имеет замкнутый производственный цикл, позволяющий управлять в рамках ЦПК изготовлением лопаток от заготовки до готовой детали.

3. Производство специализированно, т.е. деталей, подобных лопаткам турбин, за пределами ЦПК не изготавливается.

4. Персонал ЦПК обладает исключительными компетенциями в области разработки и обслуживания технологических процессов изготовления лопаток турбин, а также сопутствующими техпроцессами, влияющими на деятельность ЦПК.

5. На НПО «Сатурн» в ЦПК по изготовлению лопаток турбин организовано два технологических участка реализующих соответствующие групповые автоматизированные технологии, а именно: участок обработки рабочих лопаток ротора и участок обработки сопловых лопаток статора.

6. Конструктивный облик лопаток ротора и статора, объединенных в рамках соответствующей групповой технологии приведен на рис. 3, 4 (см. обложку).

7. По каждой групповой технологии обрабатываются детали различных типоразмеров, а именно: в потоке обработки рабочих лопаток семь наименований деталей; в потоке обработки сопловых блоков шесть наименований.

В соответствии с типом реализуемой групповой технологии производственные мощности ЦПК подразделяются на участок (линию) обработки рабочих лопаток и участок (линию) обработки сопловых лопаток (рис. 5, 6, см. обложку).

Диапазон типоразмеров обрабатываемых деталей составляет от 40 до 300 мм по длине проточной части. Мощность участка – сотни тысяч рабочих лопаток сопловых блоков в год. Мощности состоят из специального шлифовального оборудования, в основном многоцелевых станков фирмы «Станковендт» мод. SLS и SXS.

Многоцелевое оборудование для обработки рабочих и сопловых лопаток однотипно, имеет одинаковые базовые модели, отличающиеся несколько большей комплектацией (коли-

чеством опций) в части станков для обработки сопловых блоков. Кроме многоцелевого технологического оборудования, осуществляющего комплексную обработку лопаток, технологические потоки содержат несколько плоско-шлифовальных станков для глубинного шлифования мод. ЛШ-220, осуществляющих автоматизированную обработку одновременно в двух управляемых перемещениях инструмента и детали.

Наряду с технологическим оборудованием, для механической обработки в технологический поток встроено рабочее место по закреплению полуфабрикатов рабочих лопаток быстротвердеющей массой в брикет, а также рабочее место по освобождению лопаток из брикета. Рабочие места оснащены соответствующим технологическим оборудованием, а именно: электрической печью для приготовления расплава; прессом для раскалывания брикета (раскрепления деталей); а также специальной оснасткой для заливки деталей в брикет.

Кроме того в технологическом потоке размещены специальные места для складирования шлифовальных кругов, используемых в технологическом потоке, но не находящихся в данный конкретный момент в инструментальном магазине обрабатывающего центра; а также места для складирования полуфабрикатов при их движении по технологическому потоку. Движение полуфабрикатов по технологическому потоку осуществляется в специальной таре с соответствующими сопроводительными документами.

Особенностью современного производства лопаток турбин является введение обязательного электронного учета движения деталей (системы штрих-кодов на сопроводительных картах), для чего все рабочие места оснащаются персональными компьютерами, интегрированными в единую информационную сеть и считывателями штрих-кодов.

Одним из конкурентных преимуществ интегрированного производства является использование контрольной оснастки современной конструкции, т.е. оснащенной контактными щупами, передающими данные замера непосредственно в электронную базу и исключают влияние человеческого фактора при считывании измеряемых размеров с контрольных приборов.

Автоматизированное высокотехнологичное производство турбин, созданное НПО «Сатурн», – является центром компетенций ОДК в производстве деталей горячего тракта. На

этой площадке производятся не только детали для серийных двигателей Sam-146, но и обработка технологий и производство специальных деталей для новых перспективных двигателей, в частности ПД-14, изготавливаемого по отечественному проекту создания магистрального самолета МС-21.

Таким образом, данное производство наряду с функцией серийного завода исполняет роль опытной площадки ОДК по созданию новых инновационных продуктов, в том числе различными опытно-конструкторскими бюро. Причем данное производство опирается в основном на отечественные авторские технологии производства лопаток турбин, реализующиеся на отечественном оборудовании отечественным инструментом, что делает данное производство технически независимым от зарубежных производителей аналогичных продуктов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поletaev, В.А., Цветков, Е.В. Совершенствование автоматизированных технологических процессов шлифо-

вания лопаток ГТД // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 4(22). – С. 34–37.

2. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П., Норин, А.О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5(59). – С. 17–23.

### REFERENCES

1. Poletaev V.A., Tsvetkov E.V. Improvement of automated grinding processes of GTE blades // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. – 2013. – №4(22). – pp. 34-37.

2. Makarov V.F., Nikitin S.P., Norin A.O. Quality and productivity increase at profile creep feed grinding of turbine blades // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. – 2016. – №5(59). – pp. 17–23.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров

УДК 621.9  
DOI: 10.12737/22577

А.С. Ямников, д.т.н.,  
А.О. Чуприков, к.т.н.,  
А.И. Харьков, аспирант  
(Тульский государственный университет,  
300012. Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)  
E-mail: Yamnikovas@mail.ru, ArtemLine@rambler.ru

## Определение составляющих силы резания при точении в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала

Приведены аналитические зависимости, позволяющие без эксперимента рассчитать составляющие силы резания при точении с учетом износа инструмента по задней поверхности. Экспериментальная проверка показала приемлемость найденных зависимостей для практического применения, особенно важную при обработке материалов новых марок.

**Ключевые слова:** сила резания; аналитическое определение; износ инструмента.