

УДК 621.9.026.

Р. М. МУБАРАКШИН, канд. техн. наук

ООО "Урал Инжиниринг Консалтинг" Центр Прогрессивных Технологий, г. Пермь

E-mail: zpt@uralinco-centr.ru

Оптимизация вариантов технологий и методов шлифования лопаток газотурбинных двигателей

В данной статье проведен анализ технологических процессов шлифования типовых поверхностей лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и даны рекомендации по оптимальным вариантам формообразования в зависимости от типа производства. Рассмотрены основные методы шлифования лопаток. Приведены примеры применения рассмотренных вариантов шлифования лопаток из жаропрочных никелевых сплавов на шлифовальных центрах новой конструкции с непрерывной и циклической правкой и автоматической сменой шлифовальных кругов. Приведены результаты исследования качества поверхности лопаток: шероховатости, остаточных напряжений.

In this article the grinding technological processes analysis of typical surfaces of gas turbine engine (GTE) blades typical surfaces is adduced and recommendations on optimal shaping variants depending on the type of production are given. The main methods of the blades grinding are considered. The application examples of the considered variants of grinding blades from heat-resistant nickel alloys on new design grinding centers with continuous and cyclic dressing and automatic change of grinding wheels are given. The results of the blades surface quality study (roughness, residual stresses) are given.

Ключевые слова: лопатки газотурбинных двигателей, методы шлифования, производительность, качество

Key words: gas turbine engine blades, grinding methods, productivity, quality

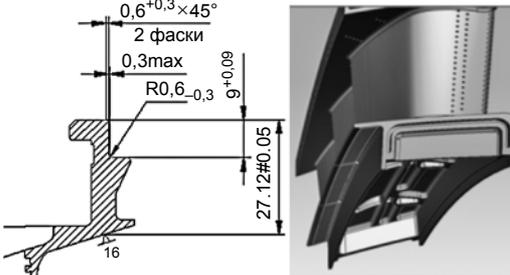
Повышение технико-экономических показателей современных машин обеспечивается за счет применения новых жаро- и износостойких материалов и сплавов, которые характеризуются более чем на порядок худшей обрабатываемостью. Эта тенденция наиболее актуальна для такого класса сложнейших машин как газотурбинные двигатели (ГТД) для авиации, наземных энергетических и газоперекачивающих установок.

Экономичность турбины, КПД в первую очередь зависят от качества изготовления и сборки соплового аппарата, который является самым дорогим и наиболее ответственным узлом турбины. Трудоемкость изготовления лопаток современной мощной газовой турбины достигает 40 % от общей трудоемкости изготовления всех ее деталей. Окончательное форми-

рование параметров качества поверхностного слоя и усталостной прочности лопаток осуществляется в значительной степени на финишных операциях механической обработки, к которым относятся процессы шлифования. Шлифование плоских, диаметральных и фасонных поверхностей составляет 20—30 % от общего времени обработки лопатки в зависимости от ее конструкции. Одними из основных параметров, определяющих эффективность процесса шлифования лопаток являются степень концентрации операций или количество поверхностей лопатки, обрабатываемых за один установ и метод шлифования поверхности.

Исходя из анализа номенклатуры лопаточного производства, для разработки оптимальных вариантов технологий и методов обработ-

Таблица 1

Типовая поверхность	Требования к точности, качеству
<p>Рабочая лопатка: "Елочный" хвостовик:</p> 	<ul style="list-style-type: none"> — точность взаимного расположения профилей — 0,01 мм — точность шага профиля — 0,002 мм — шероховатость Ra 1,6 мкм — отсутствие прижогов, растягивающих напряжений — ресурс $2 \cdot 10^7$ циклов нагрузки 14 кг
<p>Сопловая лопатка: Диаметральные и торцовые поверхности</p> 	<ul style="list-style-type: none"> — шероховатость 1,6—3,2 мкм — допуски на размеры 0,2—0,6 мм — радиусы сопряжений 0,2—0,8 мм
<p>Кольцевые пазы канавки*</p> 	<ul style="list-style-type: none"> — шероховатость 3,2 мкм — допуски на размеры 0,048—0,6 мм — радиусы сопряжений 0,2—0,8 мм

ки и контроля лопаток составлен классификатор основных типовых поверхностей лопаток. Характеристики некоторых типовых поверхностей обрабатываемых шлифованием приведены в табл. 1.

Ниже рассмотрены (табл. 2) возможные варианты технологий с различной степенью концентрации операций шлифования основных типовых поверхностей лопаток, в зависимости от типа производства*.

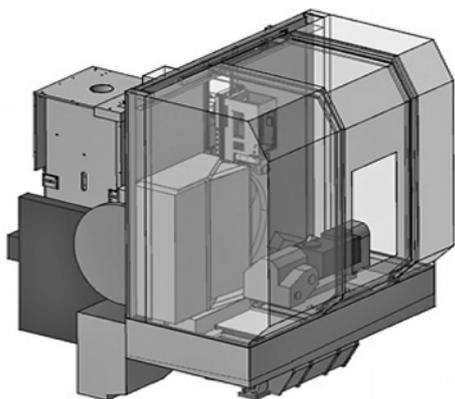
Основными критериями при выборе вариантов являются: обеспечение требуемого качества поверхности, производительность и стоимость обработки, гибкость процесса наладки и переналадки для выпуска новой лопатки, снижение непроизводительных потерь времени.

* Варианты технологий и методов обработки кольцевых пазов и канавок в данной статье в силу значительного объема не приведены и рассматриваются в материалах следующей публикации.

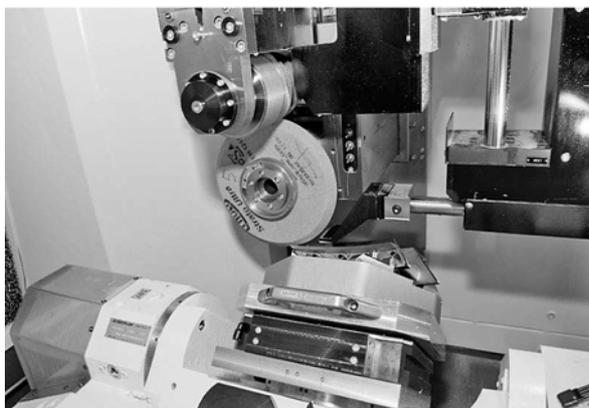
Вариант технологии комплексного шлифования реализуется за минимальное количество установов лопатки с применением самоцентрирующей, быстро устанавливаемой ос-

Таблица 2

Тип производства	Вариант технологии шлифования
Мелкосерийное производство	1. Комплексная обработка основных типовых поверхностей лопаток на: а) одном 5-координатном шлифовальном центре с магазином шлифовальных кругов за 3—4 установка; б) двух 5-координатных шлифовальных центрах с набором шлифовальных кругов на оправке.
Серийное производство	2. Дифференцированная обработка основных типовых поверхностей лопаток на нескольких специализированных 3-4-координатных станках за несколько установок.
Крупносерийное производство	3. а) обработка основных типовых поверхностей лопаток в сборе в барабане на карусельно-шлифовальном обрабатывающем центре за 2 установка; б) обработка в ГПС с автоматизированной смесью всех компонентов СПИД.



а)



б)

Рис. 1. 5-ти осевой многооперационный ОЦ с поворотно-вращающимся столом с магазином инструментов для комплексной обработки лопаток: а — компоновка станка, б — зона шлифования

настки типа Erowa с механическим закреплением заготовки. Осуществляется шлифование максимального количества поверхностей за 3—4 установка лопатки на 5-ти координатном многооперационном ОЦ (рис. 1) с поворотно-вращающимся столом с магазином шлифовальных кругов и фрез, автоматической сменой инструмента. Формообразование кольцевых пазов * и канавок в особенности поверхностей сопряжений с малым радиусом может осуществляться лезвийным методом обработки с помощью концевых и дисковых фрез.

Данный вариант обеспечивает наибольшую универсальность технологического процесса и высокую степень гибкости оборудования. Применение варианта является целесообразным в условиях мелкосерийного и опытного производства. В опытном произ-

водстве рационально применение кругов малых диаметров (до 350 мм) в силу: а) более простой смены в автоматическом цикле из магазина; б) возможности применения эльборовых (CBN) кругов; в) менее жестких требований к шпинделю; г) меньших габаритов станка и занимаемой площади; д) простоты балансировки, которая в ряде случаев не требуется.

Вариант комплексной обработки лопатки может быть также реализован на двух 5-ти координатных многооперационных ОЦ с поворотно-вращающимся столом без магазина инструментов с набором профильных кругов, устанавливаемых по ширине оправки, для шлифования типовых поверхностей. Недостатком данного варианта является большой расход кругов при непрерывной (Continuous Dressing CD) правке, который может быть уменьшен путем применения двух различных наборов правящих алмазных роликов, установленных на независимых механизмах правки. Данный вариант возможен для применения в серийном производстве, но требует большего количества установок лопатки, чем при обработке на многооперационном ОЦ с магазином шлифовальных кругов и фрез.

Вариант дифференцированной обработки осуществляется за несколько установок лопатки на специализированных 3—4-х координатных станках с применением самоцентрирующей, быстроустанавливаемой оснастки типа Erowa с механическим закреплением заготовки в приспособлении по точкам пера лопатки и базовым опорным точкам (альтернативная технология — заливка пера лопатки в кубик из легкоплавкого металла). Оборудование характеризуется специальной компоновкой станков, например, 2х шпиндельной. Данный вариант в большей степени применим для случая серийного производства. Процесс дифференцированной обработки поверхностей лопаток может быть организован в поточной или для случая с большей серийностью производства в автоматизированной линии с прямоточным расположением оборудования в виде "подковы", с встраиванием в линию средств промежуточного и окончательного контроля лопаток.

Схема линии по технологическим переходам приведена на рис. 2.

Шлифование типовых поверхностей рабочих лопаток осуществляется на специализированных 3—4-х координатных станках с CNC управлением с последующей обработкой "елочного" хвостовика на станках с 2х шпиндельной компоновкой с загрузочным поворотным столом. С целью уменьшения длины потока и соответственно экономии занимаемой площади целесообразно проводить обработку максимального количества поверхностей за 1 установ.

В крупносерийном производстве (3 вариант табл. 2) шлифованные диаметральные поверхности лопаток осуществляется на многих лопаточных производствах в сборе в барабане на модернизированных токарно-лобовых станках бакелитовыми кругами без применения СОЖ [1]. Прогрессивным процессом с использованием данной схемы является обработка в сборе в барабане на современном оборудовании типа карусельно-шлифовальный обрабатывающий центр. Производится обработка комплекта лопаток в сборе в барабане за 2 установка с применением методов абразивной и лезвийной обработки. Применение методов лезвийной обработки позволяет осуществлять обработку сложных поверхностей типа узких кольцевых пазов. Метод обеспечивает высокую производительность, но имеет невысокую гибкость процесса из-за сложности установки лопаток и низкую ремонтпригодность комплекта лопаток. Существенным недостатком является погрешность базирования лопатки, которая в каждой позиции барабана различна и в конечном итоге создает общую погрешность установки лопаток в сопловом аппарате. Альтернативным вариантом в условиях крупносерийного производства особенно при значительной номенклатуре деталей является обработка лопаток в гибкой производственной системе \ ячейке (ГПС\ГПЯ) с роботизиро-

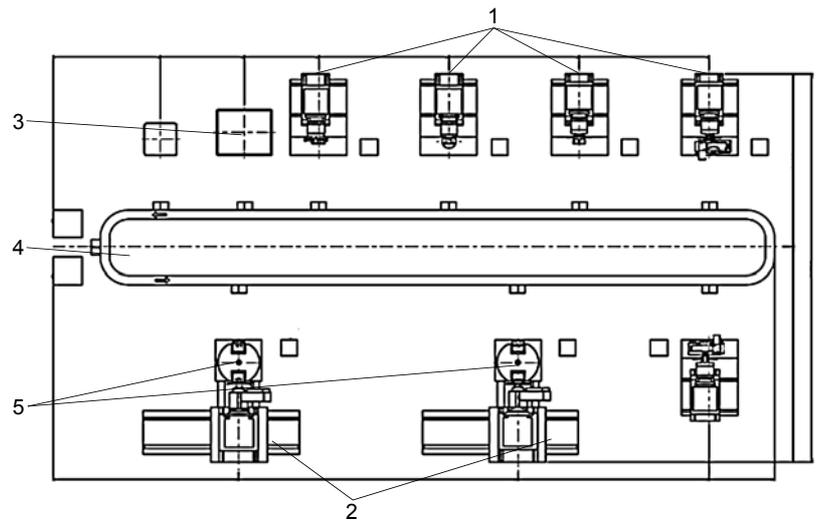


Рис. 2. Схема прямоточной линии для дифференцированной обработки типовых поверхностей лопаток: 1 — одношпиндельные шлифовальные центры; 2 — двухшпиндельные шлифовальные центры; 3 — координатно-измерительная машина; 4 — транспортная система; 5 — модуль обработка/загрузка

ванной установкой \ снятием всех компонентов системы СПИД — лопаток, шлифовальных кругов, алмазных правящих роликов и автоматизированной сменой установочных элементов оснастки.

Системы 3-его уровня автоматизации процесса применялись на ведущих фирмах при обработке лопаток [2] в 90 гг. прошлого столетия, но были реализованы на жесткой сложно переналаживаемой элементной базе. Переналадка системы на выпуск новой лопатки осуществлялась путем остановки производства на длительный срок для смены станочной и измерительной оснастки, приспособлений.

Современная ГПЯ на быстропереналаживаемой элементной базе, включая средства контроля, роботизированную загрузку лопаток, смену оснастки, шлифовальных кругов и др., позволяет осуществлять оперативную переналадку системы на выпуск новой лопатки в течение нескольких минут. С целью исключения ошибок базирования, связанных с погрешностью формы заготовок лопаток система оснащена встроенным контролем положения базовых поверхностей для автоматизированной наладки и подналадки процесса. Многоуровневая система CNC управления обеспечивает функционирование компонентов системы

процесса обработки и контроля лопаток. Результаты расчетов показали, что вариант двухшпиндельной ГПЯ в случае большой программы выпуска турбинных лопаток (более 250 000—300 000 штук рабочих лопаток в год) будет эффективней, чем вариант автоматизированной линии с обработкой на нескольких специализированных 3—4-х координатных станках. Основными критериями для расчетов были приняты производительность, степень гибкости системы, непроизводительные потери времени, занимаемая площадь, общая стоимость системы, включая обслуживание.

Во всех рассмотренных вариантах важным является определение необходимых и достаточных параметров и требований, предъявляемых к шлифовальному центру для высокопроизводительного и качественного шлифования. Основные технологические параметры и свойства, которые необходимо рассматривать при выборе шлифовального центра для высокопроизводительного и качественного шлифования турбинных лопаток приведены ниже:

- зона шлифования и количество шпинделей, скорость вращения и мощность шпинделя, размер шлифовального круга, диаметр и типы планшайб для установки на шпиндель, автоматическая балансировка шлифовального круга;
- число управляемых системой ЧПУ/CNC координат, типы измерительных систем: абсолютные линейные датчики (РС 0,00001 мм) перемещений, координатные датчики положения поверхностей;
- уровень автоматизации основных процессов. Модуль обработка/загрузка, модуль автоматической смены шлифовальных кругов, правящих роликов. Системы активного и пассивного адаптивного контроля параметров процесса шлифования и наладки;
- устройства для профильной правки круга: непрерывная правка CD, циклическая правка (ID) алмазным диском (контурная правка) или роликом (профильная правка) от стола. Опция важна для мелкосерийного производства;
- устройства перемещения сопел СОЖ с автоматической компенсацией износа шлифовального круга. Оборудование для сбора, фильтрации и подачи СОЖ под давлением в зону резания и гидродинамической очистки шлифовального круга;
- делительные головки для 4х сторонней обработки. Модули позиционирования и крепления детали. Зажимные приспособления определяют в значительной степени успешность реализации проекта. Неправильная, маложесткая конструкция зажимных приспособлений может привести к удлинению срока внедрения дорогостоящего оборудования и даже невозможности достижения поставленных целей.

Методы шлифования лопаток. Другим важным параметром, определяющим эффективность обработки лопаток, является метод шлифования, применяемый для снятия больших припусков из труднообрабатываемых материалов. Ниже рассмотрены наиболее применимые основные методы шлифования.

Метод глубинного шлифования с непрерывной правкой высокопористого абразивного круга на керамической связке алмазным роликом CD рассматривается как основной в силу эффективного использования при шлифовании лопаток из труднообрабатываемых сталей и сплавов [2]. Производительность метода шлифования характеризуется коэффициентом $Q'zmm^3/mm \cdot сек$ — величиной удельного съема материала. Для технологии шлифования с непрерывной правкой электрокорундовым кругом это значение лежит в зависимости от материала лопатки в пределах от 20 до 50 куб. мм на 1 мм ширины шлифовального круга, снятого за 1 секунду работы. Для охлаждения детали и гидродинамической очистки круга СОЖ подается в зону под давлением 18—20 бар с помощью профильных программно управляемых сопел. При определенных условиях и требованиях к операции шлифования находят применение эльборовые (CBN) однослойные круги на металлической связке. В первую очередь они эффективны в случае шлифования наружных и внутренних переход-

ных зон с малыми радиусами $R < 1$ мм и высокими требованиями к точности и шероховатости поверхности, так как применяется мелкое зерно размером 60—80 мкм и мельче. Стоимость такого круга на порядок превышает стоимость абразивного круга, например, стоимость однослойного круга с "елочным" профилем может достигать 3500 \$. Одного комплекта однослойных кругов хватает для шлифования 300—500 рабочих лопаток в зависимости от материала и геометрии поверхностей, что в свою очередь существенно превышает этот показатель в случае применения высокопористых абразивных кругов. Применение данной технологии не требует использование дорогостоящих правящих алмазных роликов для правки, уменьшает оперативные запасы инструмента, но требует четкой организации процесса восстановления, регенерации рабочей поверхности кругов. Применяются также CBN многослойные круги на керамической связке, с возможностью периодической правки профиля алмазным роликом для микроразрушения и удаления затупившихся зерен. CBN — круги имеют меньшую зернистость и обеспечивают, соответственно меньшую, порядка $15 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{сек}$ величину производительности, чем при глубинном шлифовании корундовым кругом с CD-правкой. Преимущество CBN-кругов в более высокой размерной и временной стойкости.

Другим методом шлифования лопаток является применение **VIPER** технологии. **VIPER** технология характеризуется применением высокого давления СОЖ для охлаждения детали, которое должно быть не менее 40 бар. Для гидродинамической очистки круга СОЖ подается через программно управляемые сменные сопла под давлением 70 бар, тем самым обеспечивается очистка пор и зерен, предотвращается эффект "засаливания" поверхности круга и поддерживается режущая способность инструмента. Используются абразивные круги на керамической связке с периодической правкой алмазным роликом. Непрерывная правка алмазным роликом использована на станках типа G9 фирмы Makino (Англия). Для шлифова-

ния сложных поверхностей с малыми радиусами профиля применяются CBN однослойные круги с последующей их регенерацией и эльборовые CBN-круги на керамической связке, с возможностью ID правки. Производительность метода составляет в зависимости от метода правки до 70 куб. мм на 1 мм ширины шлифовального круга, снятого за 1 секунду работы, но при длительном профильном шлифовании величина удельного съема Q резко снижается даже при непрерывной правке. Несмотря на более высокие показатели производительности методу **Viper** присущи существенные недостатки, к которым относятся:

1. Отсутствие устройства непрерывной правки ограничивает применение оборудования в силу износа профиля круга и потери режущей способности. На больших лопатках с длиной шлифования поверхности более 100 мм данная технология не обеспечивает необходимую точность, качество и производительность обработки;

2. Быстрый износ высоконапорных насосов и ненадежность конструкции форсунок подачи СОЖ приводит к длительным простоям оборудования и дорогостоящему ремонту;

3. Незначительное падение давления в системе подачи СОЖ и точность подачи СОЖ в зону существенно влияют на производительность, эффективность охлаждения и качество поверхности;

4. Периодическое забивание пор шлифовальных кругов стружкой под действием высокого давления СОЖ;

5. Применение высокопористых кругов очень высокой степени затрудняет получение шероховатости поверхности ниже $Ra 2,5$ мкм.

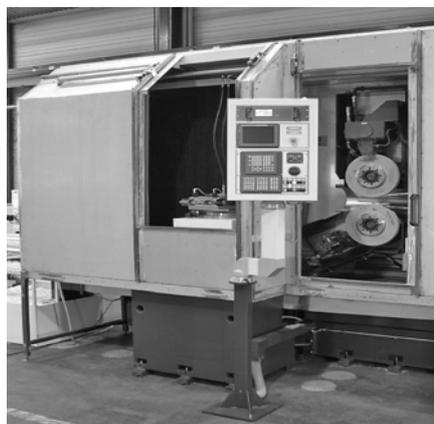
Необходимо отметить также, что единственным изготовителем кругов для технологии **Viper** является фирма **Tirolit** (Австрия). В силу выше указанных причин метод в настоящее время нашел ограниченное применение.

Ниже рассмотрены реализованные в производстве с участием автора варианты шлифования наиболее сложных типовых поверхностей рабочих и сопловых турбинных лопаток с применением прогрессивных методов обработки.

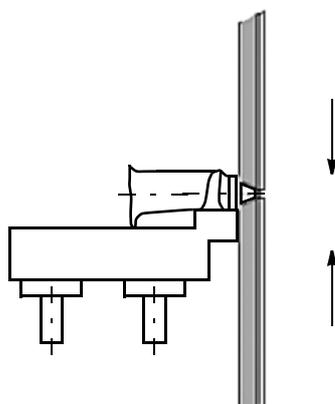
Дифференцированная обработка типовых поверхностей рабочих лопаток турбин. Шлифование "елочного" хвостовика. По данному варианту "елочный" хвостовик рабочих лопаток шлифуется на двухшпиндельных станках методом глубинного шлифования [3]. Схема обеспечивает высокую производительность за счет непрерывной правки и взаимной компенсации радиальных усилий. Однако применение данной схемы характеризуется сложной, не стабильной во времени наладкой правящих устройств в осевом направлении. В результате существуют проблемы обеспечения высокой точности и качества поверхности профиля, а также обеспечения взаимного расположения профилей хвостовика в пределах заданного допуска 0,01 мм. Причинами этого являются устаревшая конструкция используемых станков, отсутствие ЧПУ управляемых механизмов перемещения правящих устройств в осевом направлении, неэффективное охлаждение зоны резания, а также отсутствие на некоторых станках механизмов CD-правки. Решением данной проблемы для прогрессивного процесса шлифования явилось применение двухшпиндельных станков с измененной конструкцией шпиндельного узла и правящих устройств, с комбинированной CD и ID правкой, а также с возможностью CNC наладки и подналадки в осевом направлении верхнего шпинделя механизма непрерывной правки для

обеспечения требуемой точности взаимного расположения профилей (рис. 3).

Данная схема обеспечивает высокую точность взаимного расположения профилей за счет наличия CNC регулировки в осевом направлении верхнего механизма CD правки и применения на окончательных проходах ID-правки от стола для обеспечения точности взаимного расположения профилей в пределах 0,01 мм. Исключение из процесса CD правки приводит к значительному увеличению более чем в 1,5 раза продолжительности цикла шлифования. Например, шлифование профиля 5-зубой лопатки из высокожаропрочного литейного сплава на хромоникелевой основе типа ЖС-32, склонного к трещинообразованию производится кругами характеристики 25A 10П ЗИ31-32. Для снятия основного припуска без образования прижогов и растягивающих остаточных напряжений необходимо 8—10 проходов с CD правкой. После чего производится 3—4 прохода с правкой от стола, включая выхаживающий для обеспечения требуемой точности взаимного расположения профилей в пределах 0,01 мм и снижения шероховатости поверхности до Ra 1,6 мкм. При шлифовании без CD правки с применением только правки от стола требуется 22-прохода. Увеличиваются также потери времени, связанные с холостыми ходами при правке. 2-х шпиндельная система может работать с большими радиальными силами шлифования благодаря их взаимной компенсации. Учитывая, что указанное выше значение параметра $Q'z$ дано для 1 шпинделя, в случае если станок имеет 2 одновременно работающих шпинделя, технологические возможности станка по параметру производительности теоретически должны удваиваться. Практически производительность увеличивается в 1,5—1,7 раза в сравнении со схемой 1 шпиндельного шлифования. Роста производительности в 2 раза не наблюдается в связи с различными ус-



а)



б)

Рис. 3. Компонка двухшпиндельного станка с подвижной колонной типа MICRO-CUT 4-320DS а); наладка операции шлифования елочного хвостовика б)

радиальными силами шлифования благодаря их взаимной компенсации. Учитывая, что указанное выше значение параметра $Q'z$ дано для 1 шпинделя, в случае если станок имеет 2 одновременно работающих шпинделя, технологические возможности станка по параметру производительности теоретически должны удваиваться. Практически производительность увеличивается в 1,5—1,7 раза в сравнении со схемой 1 шпиндельного шлифования. Роста производительности в 2 раза не наблюдается в связи с различными ус-

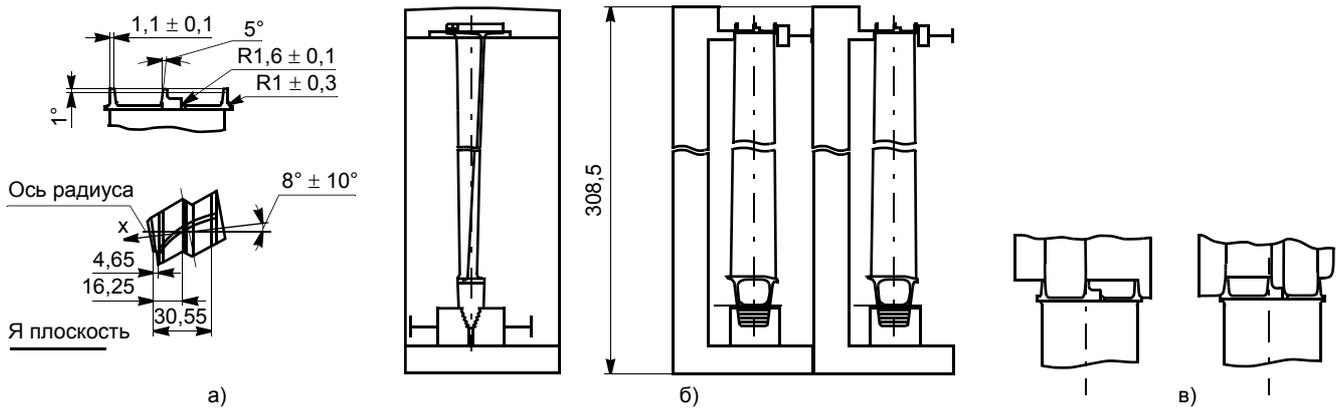


Рис. 4. а) Шлифуемый профиль лопатки с бандажной полкой, б) схема базирования лопатки, в) профиль кругов для шлифования полок

ловиями шлифования на участках елочного профиля. Вершина профиля работает по схеме наружного шлифования с благоприятными условиями для работы зерна в режиме самозатачивания с максимальной режущей способностью круга, а на боковых участках шлифуемого профиля зерна круга работают в неблагоприятных условиях торцевого шлифования [4] в режиме затупления и образования площадок износа, что как следствие приводит к образованию прижогов. Вследствие несимметричного расположения оси профилей верхнего и нижнего кругов (рис. 3, б) относительно оси шлифуемых профилей лопатки это обстоятельство на торце профиля, расположенном ближе к бандажной полке усугубляется и приводит к необходимости снижения режимов шлифования для исключения прижогов. При одношпиндельной схеме профиль круга расположен симметрично относительно шлифуемого елочного профиля.

Шлифование бандажных полок, лабиринтов, торцев пера. Бандажная полка, гребешки лабиринтов, торцы пера обрабатываются зачастую в сборе в барабане на модернизированных токарно-лобовых станках бакелитовыми кругами. Данный процесс является экологически вредным и травмоопасным, не стабильным, а также имеет низкий уровень механизации.

Прогрессивный и оптимальный вариант шлифования данных поверхностей реализован на 4-х координатных станках типа MICRO-

CUT 4-250 и Smart N6 с CD правкой. Станки имеют модульную конструкцию с подвижной стойкой с CNC управлением по 4-м координатам. Они компактны, занимают малую площадь по фронту и отвечают всем требованиям для встраивания в технологическую линию для реализации технологии дифференцированной обработки поверхностей лопаток и могут оснащаться магазином шлифовальных кругов и системой для их автоматического снятия и установки. Пример данного варианта и результаты по качеству и производительности приведены ниже. Эскиз лопатки с конструкцией бандажной полки показан на рис. 4.

Лопатка базируется по елочному профилю с упором и поджимом по торцу полки в верхней части. Такая схема (рис. 4, б) закрепления обеспечивает точное базирование лопатки. Для снятия припуска используют два типа профильных кругов (рис. 4, в). Это позволяет снизить время обработки бандажной полки и добиться получения более точного профиля.

Применение нового оборудования и технологии с использованием высокопористых электрокорундовых кругов марки 25A10 12K со шлифованием с СОЖ обеспечивает значительное уменьшение высоты шероховатости обработанной поверхности. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что среднее арифметическое отклонение профиля R_a торца бандажной полки турбинной лопатки шлифованного на станке MicroCut 4 составляет 0,7...0,8 мкм (рис. 5), тогда как

после обработки на токарно-лобовом станке МК163М шероховатость поверхности составляет R_a 1,06...1,25 мкм. Среднее арифметическое отклонение шероховатости профиля R_a периферийной части бандажной полки шлифованной на станке MicroCut 4 составляет 0,63...0,68 мкм, а на МК163М — 0,85...1,1 мкм.

Величина и характер распределения по глубине остаточных напряжений 1-го рода являются важнейшими показателями качества детали, по которому оценивают новые процессы, внедряемые при обработке деталей из жаропрочных материалов.

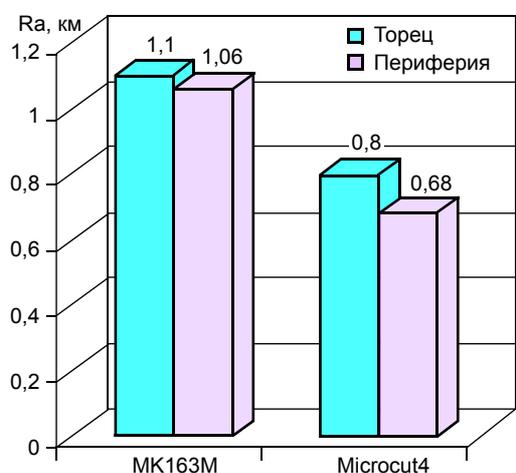


Рис. 5. Влияние метода обработки на шероховатость торцевых и периферийных поверхностей полок турбинных лопаток

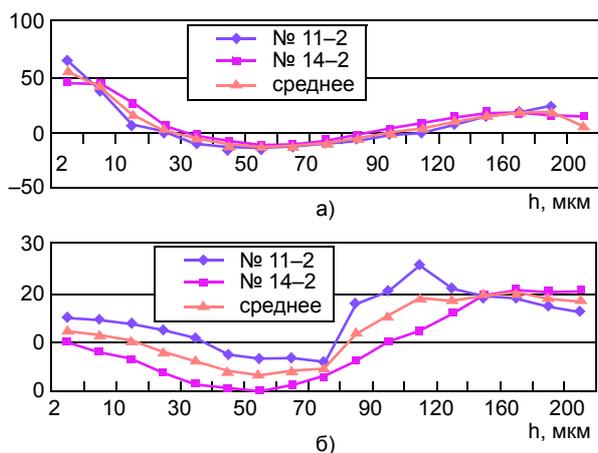


Рис. 6. Характер распределения остаточных напряжений σ по глубине слоя h правой периферийной части полки лопатки турбины после обработки на токарно-лобовом станке МК163М (а); на станке MicroCut 4-250 (б)

При обработке периферийных поверхностей наибольшие растягивающие напряжения до $65,1 \text{ кг/мм}^2$ обнаружены (рис. 6, а) после шлифования на токарно-лобовом станке МК163М.

Применение метода глубинного шлифования на станке MicroCut 4-250 приводит к снижению величины растягивающих напряжений до $20,7 \text{ кг/мм}^2$ (рис. 6, б). Использование метода глубинного шлифования торцевых поверхностей на станке MicroCut 4 приводит к увеличению остаточных напряжений сжатия до $-39,8 \text{ кг/мм}^2$ на глубине 10—70 мкм. Это положительно сказывается на эксплуатационных показателях и повышает предел выносливости лопаток [3].

Внедренные технологии и оборудование для шлифования позволили реализовать прогрессивный технологический процесс комплексной дифференцированной обработки поверхностей рабочих лопаток турбин (схема рис. 2) согласно варианту 2 (табл. 2). Для окончательного контроля в прогрессивном процессе применена КИМ цехового типа CenterMax, которая не требует создания лабораторных условий при эксплуатации и может быть установлена непосредственно в цехе — в технологической цепочке оборудования. Система активного сканирования поверхностей позволяет произвести контроль с измерением всех размеров и взаимного расположения шлифованных поверхностей за 8—10 минут в зависимости от конструкции.

Комплексная обработка типовых поверхностей сопловых лопаток

Шлифование базовых поверхностей сопловых лопаток производится на 4-х координатных станках с СД правкой и CNC управлением. Комплексная обработка диаметральных поверхностей сопловых лопаток осуществляется согласно варианту 1 (табл. 2) на 5-координатном шлифовальном центре MICRO-CUT 4-520 CNC с поворотным-вращающимся столом с магазином шлифовальных кругов. С целью исключения коллизий при шлифовании проведено моделирование процесса шлифования всех поверхностей лопатки с установкой ее в

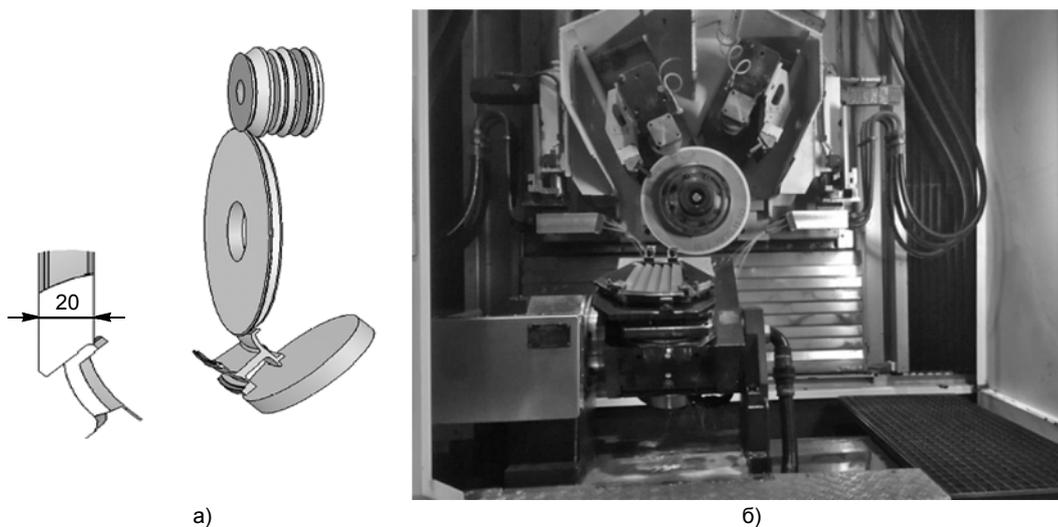


Рис 7. Моделирование процесса шлифования типовых поверхностей сопловых лопаток на 5-координатном центре с поворотнo-вращающимся столом с магазином шлифовальных кругов а) и зона обработки с наладкой операции шлифования б)

оснастке (рис. 7, а). Наладка станка MICRO-CUT 4-520CNC для шлифования с приспособлением, в котором закрепляется и базировается сопловая блочная лопатка приведены на рис. 7, б.

Применение шлифовального центра с поворотнo-вращающимся столом позволяет заменить не стабильный, трудоемкий, экологически вредный процесс обработки лопаток в барабане на модернизированных токарно-лобовых станках бакелитовыми кругами без применения СОЖ на детерминированный процесс шлифования поверхностей лопатки электрокорундовыми кругами на керамической связке с непрерывной правкой и с охлаждением СОЖ. Для исключения прижогов особенно в зоне торцевых участков полок лопатки применены весьма мягкие круги открытой структуры.

Выводы по работе:

1. Проведен анализ технологических процессов шлифования типовых поверхностей лопаток ГТД и оборудования, даны рекомендации по оптимальным вариантам в зависимости от типа производства.
2. Рассмотрены основные методы шлифования лопаток ГТД и область их применения.
3. Применение методов глубинного шлифования лопаток с CD правкой на шлифовальных центрах новой конструкции заменяет неста-

бильный, трудоемкий, экологически вредный процесс обработки лопаток в сборе в барабане на токарно-лобовых станках бакелитовыми кругами и позволяет: а) обеспечить качественный, детерминированный процесс шлифования поверхностей лопатки электрокорундовыми кругами; б) снизить величину шероховатости шлифованной поверхности в 1,5 раза; в) снизить величину остаточных растягивающих напряжений на периферийной части полки в среднем 65 до 21 кг/мм², повысить величину остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое торцевой части полки в среднем с 15 до 40 кг/мм²; г) повысить стабильность процесса и минимизировать отклонения деталей по геометрии от требований КД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. Lang G., Salje E. Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen / Essen. Verlag-Vulkan, 1989. 198 с.
3. Братухин А. Г., Решетников Ю. Е., Иноземцев А. А. Основы создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / М.: Авиатехинформ, 1999. 554 с.
4. Мубаракшин Р. М. Управление режущей способностью и износостойкостью абразивного инструмента методом пропитки // Вестник машиностроения. 1991. № 5. С. 21—27.