

УДК 621.92

DOI: 10.12737/article\_5aacd857ebb357.07694535

**В.Ф. Макаров**, д.т.н.,

**С.П. Никитин**, к.т.н.

(Пермский научный исследовательский политехнический университет,  
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

E-mail: makarovv@pstu.ru

### Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ

*Представлена методика назначения режимов резания при глубинном профильном шлифовании на многокоординатном станке с ЧПУ на основе моделирования термодинамических процессов в зоне резания с целью обеспечения сопротивления усталости лопаток турбин. Приведены математические модели, позволяющие определять прогнозировать динамику упругих, тепловых и рабочих процессов в технологической системе, съем материала, силу резания, температуры в зоне резания и шероховатость каждого элементарного участка профиля поверхности на основе режимов резания, характеристики круга.*

**Ключевые слова:** технология обработки; глубинное шлифование; многокоординатная обработка; динамическая система станка; динамические характеристики.

**V.F. Makarov**, D. Eng.

**S.P. Nikitin**, Can. Eng.

(Perm Scientific Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990)

### Efficiency increase in profile deep grinding of turbine blade on NC multi-axes machines

*The paper reports the procedure of a cutting mode purpose at deep profile grinding on NC multi-axes machines on the basis of the modeling of thermo-dynamic processes in cutting areas with the purpose of ensuring turbine blade fatigue resistance. There are shown simulators allowing the definition and prediction of the dynamics of elastic, thermal and working processes in a technological system, material removal, cutting force, temperatures in the area of cutting and roughness of each elementary area of the surface profile on the basis of cutting modes, disk characteristics.*

**Keywords:** processing technology; deep grinding; multi-axes processing; machine dynamic system; dynamic characteristics.

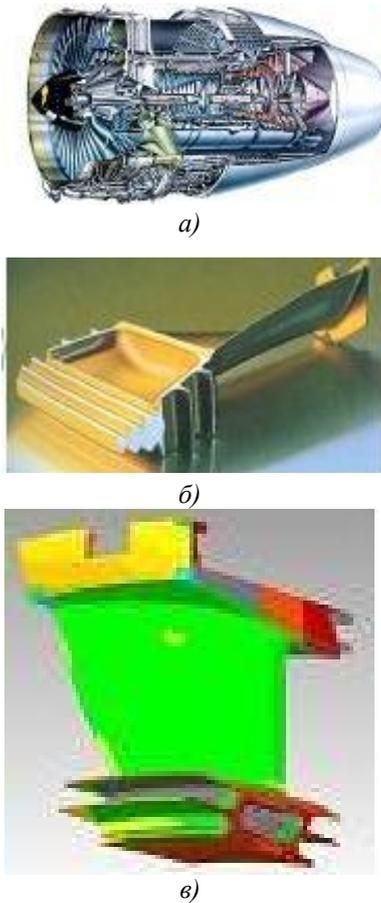
Одними из самых ответственных, сложных и трудоемких деталей газотурбинного двигателя (ГТД) являются лопатки турбины, которые во многом определяют эффективность работы и долговечность всего двигателя. Лопатки турбин газотурбинных двигателей должны сохранять работоспособность в условиях действия высоких температур (до 1400 °С) и знакопеременных нагрузок. Поэтому в ТУ лопаток турбин ГТД гражданской авиации включено требование по сопротивлению усталости и введен обязательный контроль лопаток на сопротивление усталости по хвостови-

ку (предел выносливости  $\sigma_{-1}$  до 110...140 МПа).

Лопатки имеют сложную пространственную форму (рис.1).

В качестве заготовок используют современные жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе (ЖС6У-ВИ, ЖС26, ЖС32, ЧС70 и др.) в виде литых заготовок с направленной кристаллизацией с оставляемым припуском под механическую обработку 1...8 мм. Жаропрочные сплавы отличаются сложным химическим составом (до 20 химических элементов), большим содержанием тугоплавких

материалов (вольфрам до 12 %, молибден до 2,5 %) и наличием карбидов, нитридов и др., отличающихся повышенной твердостью. При изготовлении должна быть обеспечена точность взаимного положения лопаток, прочность их закрепления и долговечность. Базовые поверхности лопатки ГТД имеют жесткие требования по размерной точности и показателям качества поверхностного слоя: отклонения по шагу зубьев хвостовика в пределах 0,02...0,005 мм; угловые параметры на уровне 20...30'; допуски на радиусы составляют 0,05...0,1 мм; параметр шероховатости –  $Ra$  0,63...2,5 мкм; допуски на взаимное расположение поверхностей на уровне 0,01 мм.



**Рис. 1. Общий вид:**  
 а – газотурбинного двигателя; б – рабочей лопатки;  
 в – сопловой лопатки

Для обеспечения данных требований используют механическую обработку. Механическая обработка этих сплавов связана с большой трудоемкостью из-за высокой прочности  $\sigma_b$ , низкой теплопроводности  $\lambda$  и плохой обрабатываемости. Поэтому для окончательной обработки опорных поверхностей рабочих и сопловых лопаток турбин ГТД применяется, главным образом, глубинное шлифование [1, 2]. Для повышения точности, гиб-

кости и производительности обработка осуществляется на многокоординатных обрабатывающих центрах с ЧПУ. При этом возникают проблемы с размерной точностью сложного профиля лопатки, а также с дефектами поверхностного слоя в виде прижогов и трещинообразования на ряде поверхностей [1 – 3]. После усталостных испытаний лопаток в поверхностном слое елочных замков фиксируются трещины, которые направлены перпендикулярно или под некоторым углом (30°) вглубь металла (рис. 2). Протяженность этих трещин достигает 9...12 мм, а глубина составляет 0,1...0,4 мм.

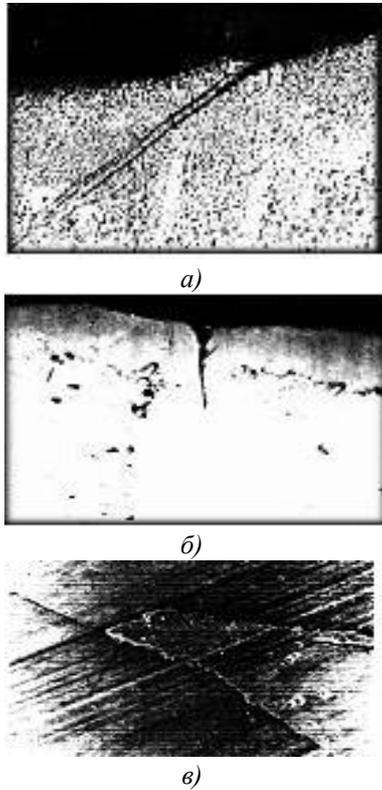
Для обеспечения заданной размерной точности, качества поверхностного слоя и сопротивления усталости лопаток ГТД при обработке приходится реализовывать множество проходов [1], что снижает производительность глубинного шлифования.

На сегодняшний день удалось решить целый ряд научных и производственных проблем глубинного шлифования. Это позволило внедрить на предприятиях авиационной промышленности для обработки замковых и базовых поверхностей турбинных лопаток профильное глубинное шлифование на специализированных многокоординатных станках с ЧПУ с использованием высокопористых кругов [2].

Однако полноценной реализации потенциальных возможностей процесса профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ мешает недостаточная изученность условий резания при одновременном формировании различных участков сложной обрабатываемой поверхности, недостаточный уровень теоретических исследований, моделирования и назначения научно-обоснованных режимов профильного глубинного шлифования.

В настоящее время отсутствуют рекомендации по выбору обоснованных режимов обработки сложных поверхностей методом глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ, обеспечивающих заданные показатели качества поверхностного слоя и сопротивление усталости турбинных лопаток. Отсутствует методика прогноза результатов обработки и назначения научно-обоснованных режимов профильного глубинного шлифования при технологической подготовке производства; нет обобщенного представления процесса профильного глубинного шлифования поверхностей сложного профиля, включающего в себя взаимодействие упругих механических и тепловых процессов в зоне резания.

Отсутствует комплексная термодинамическая модель процесса глубинного шлифования, позволяющая оценить влияние режимов обработки на параметры процесса (съем, силы, температура, тепловые потоки), качество поверхностного слоя и эксплуатационные показатели детали (сопротивление усталости).



**Рис. 2. Микрошлифы усталостных трещин:**  
*a* – трещина под углом 30°; *б* – трещина под углом 90°;  
*в* – характер излома трещины

В данной работе предлагается методика технологического обеспечения повышения качества и сопротивления усталости деталей ГТД путем выбора режимов и характеристики профильных кругов при профильном глубинном шлифовании на многокоординатных станках с ЧПУ путем выделения элементарных участков обрабатываемой поверхности и прогноза качества их обработки по математической модели, отображающей термодинамические процессы в зоне резания.

При этом профильное глубинное шлифование на многокоординатных станках с ЧПУ рассматривается с учетом его системных особенностей, таких как: различная фактическая кинематика процесса, переменность контакта инструмента и заготовки, переменность скорости и силы резания, припусков обработки. В рамках исследований процесса формообразования рассматриваются объекты пространства

технологического взаимодействия: станок, приспособление, заготовка, инструмент и процесс резания. Взаимодействие объектов в математической модели отражается в виде связей – геометрических, силовых, упругих, тепловых и др. Для математического описания взаимодействия объектов и связей между ними использован метод элементарных участков поверхности (МЭУП). МЭУП связан с первоначальным разделением обрабатываемой сложной поверхности на элементарные участки, которые отличаются условиями формообразования и последующей разработкой математической модели процесса шлифования для каждого элементарного участка [7, 8].

Обеспечение эксплуатационных характеристик детали и заданных показателей качества поверхностного слоя обрабатываемого профиля возможно при оптимальных значениях параметров процесса шлифования каждого из элементарных участков обрабатываемой поверхности на основе выбора рациональных режимов резания и структуры шлифовального круга на основе прогнозирования параметров обработки по математической модели термодинамических процессов в зоне обработки [8].

Методика назначения рациональных режимов глубинного шлифования поверхностей сложного профиля, обеспечивающая заданную производительность, качество, надежность и долговечность, должна включать 5 этапов (рис. 3).

При разделении процесса формообразования при профильном глубинном шлифовании лопаток ГТД необходимо руководствоваться следующими принципами:

- Обработку сложных поверхностей лопаток представить как композицию элементарных поверхностей профиля, отличающихся схемами формообразования и шлифования.

- Выделяют несколько видов поверхностей, которые определяют форму базовых элементов лопаток: плоские, цилиндрические, кольцевые поверхности и их комбинации, к которым предъявляются заданные требования по точности расположения и качеству поверхностного слоя. Для каждого вида поверхности используют свои схемы шлифования для формирования образующих и направляющих линий формообразования. Поэтому для классификации целесообразно использовать движения формообразования (рис. 4).

- Для большинства схем глубинного шлифования образующая линия получается методом копирования профиля шлифовального круга.



Рис. 3. Этапы назначения рациональных режимов глубинного шлифования поверхностей сложного профиля

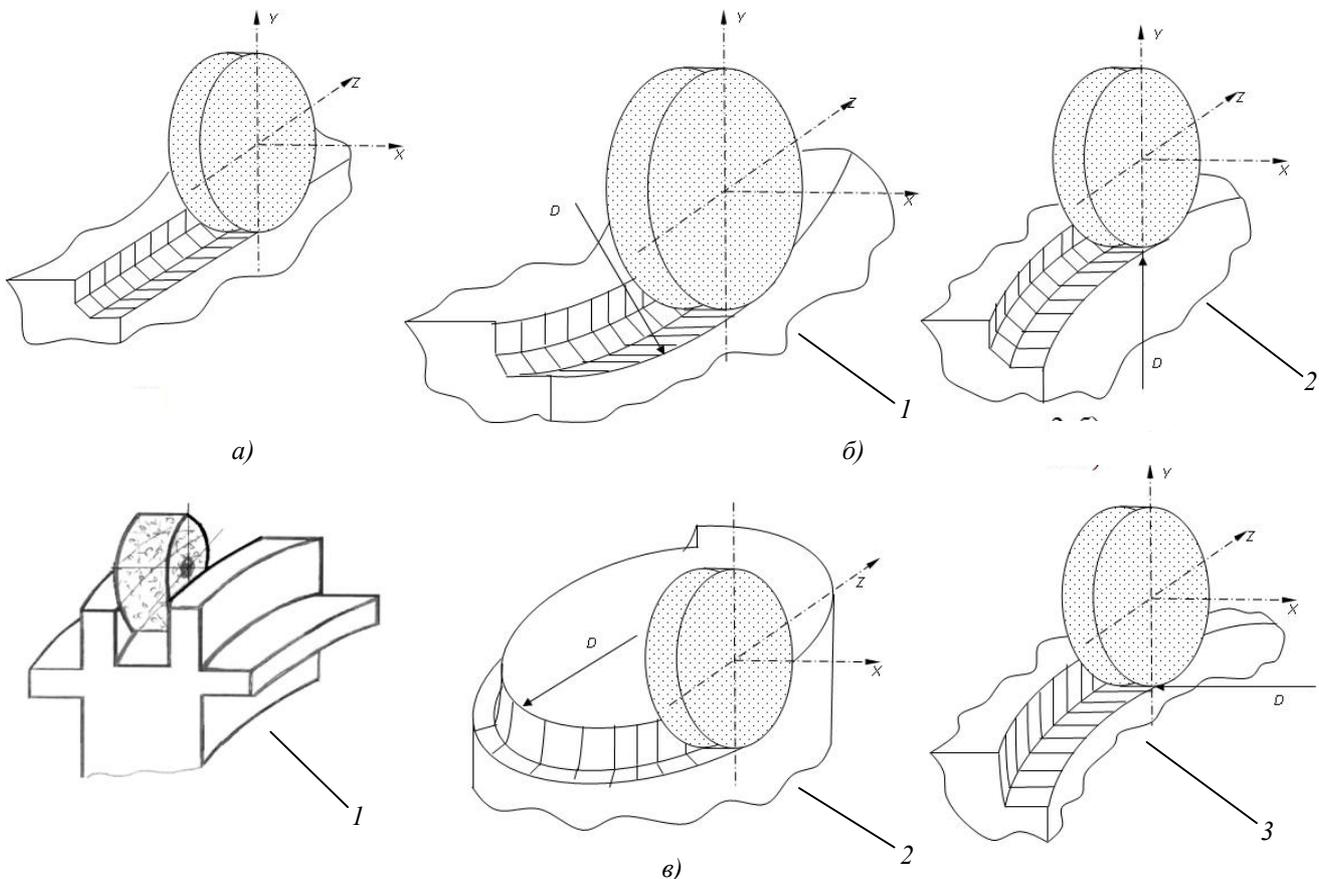


Рис. 4. Схема формообразования плоских поверхностей (а); схема формообразования цилиндрических поверхностей (б):

1 – внутреннее цилиндрическое шлифование; 2 – наружное цилиндрическое шлифование;  
**схема формообразования кольцевых поверхностей (в):** 1 – схема шлифования кольцевой канавки торцевой поверхностью круга; 2 – формирование внутренней поверхности кольцевой канавки; 3 – формирование внутренней поверхности кольцевой канавки

• Любой сложный профиль можно представить как композицию элементарных участков профиля и простых схем шлифования: 1) прямая образующая линия, производимая периферией круга; 2) прямая образующая линия, производимая торцом круга; 3) прямая образующая линия, производимая наклонной

поверхностью круга.

• Направляющая линия формообразования определяется схемой шлифования: 1) плоское шлифование; 2) внутреннее и наружное цилиндрическое шлифование; 3) шлифование внутренней и наружной поверхности кольцевой канавки торцевой поверхностью круга и др.

Замена реального профиля совокупностью элементарных участков профиля позволит с достаточной точностью выявить различия сил резания, действующих на зерно; упругих и динамических деформаций; величин съема; температур в зоне резания при моделировании процесса глубинного шлифования.

Для каждого элементарного участка поверхности должна быть известна математическая модель кинематики контакта круга и заготовки, определяющая зависимость площади контакта ( $l, b$ ) от режимов резания ( $t, S, v$ ) в динамическом режиме [4].

Для процесса формообразования каждого элементарного участка поверхности разрабатывается математическая модель (этап 2). Для адекватного описания глубинного шлифования в математической модели необходимо учесть динамику технологического оборудования, рабочего процесса и тепловых процессов в зоне резания (рис. 5).

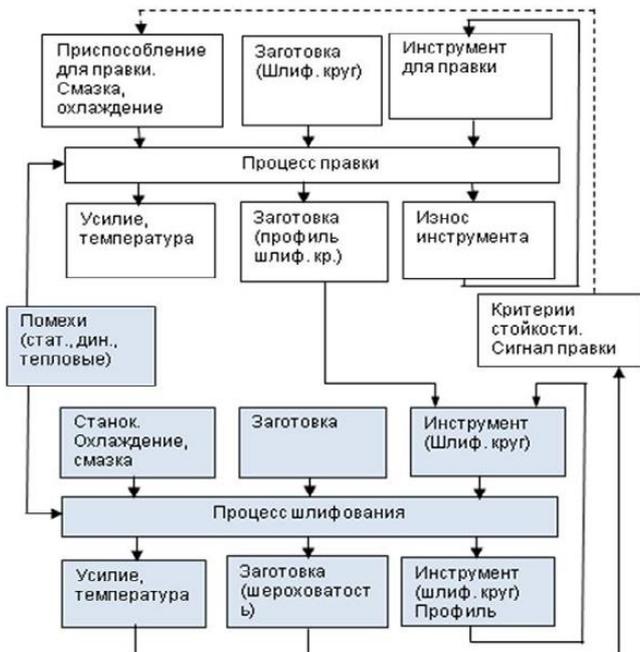


Рис. 5. Динамическая система «станок–заготовка–инструмент» с процессом шлифования и правки (по W. Dietrich)

В данной работе для исследований использована математическая модель технологической системы шлифовального станка, учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания [5, 6]. Одновременное отображение тепловых и механических процессов вызывает большие сложности, поэтому для построения математической модели предлагается использовать метод прямой аналогии (МПА) [5]. МПА включает в себя:

выявление физических подсистем; разработку расчетной схемы; выделение существенных физических явлений и построение механической цепи для каждой подсистемы; переход от механической цепи к эквивалентной схеме; объединение эквивалентных схем подсистем в единую систему; составление уравнений по единой эквивалентной схеме.

Расчетная схема технологической системы процесса глубинного шлифования представлена на рис. 6: упругая система станка, рабочий процесс, тепловые процессы в зоне резания.

Модель упругой системы станка представлена в виде отдельных сосредоточенных масс, соединенных жесткостями и обладающих определенным демпфированием колебаний. Для сокращения числа степеней свободы и упрощения модели некоторые связи между соседними элементами принимаются абсолютно жесткими, если ожидаемое перемещение по соответствующим координатам мало влияет на относительные смещения шлифовального круга и стола.

Модель рабочего процесса. Шлифование представлено как процесс пластического деформирования и разрушения материалов детали и круга (рис. 7).

Математическая модель подсистемы процесса шлифования представляет собой передаточную функцию апериодического звена. Математическая модель учитывает, что изменения условий обработки (подача, ширина круга, зернистость и т.д.) влияют на силы резания через изменение фактического, а не номинального сечения срезаемого слоя. При этом процессы микрорезания зерен, находящихся в контакте с заготовкой, представлены в следующем виде:

$$P + T_p P = h_{px} x + k_{py} y + h_{py} y + k_{pz} z + h_{pz} z,$$

где  $k_{px}, k_{py}$  – коэффициенты резания по осям  $x, y$ ;  $h_{px}, h_{py}, h_{pz}$  – коэффициенты демпфирования по координатам  $x, y, z$ .

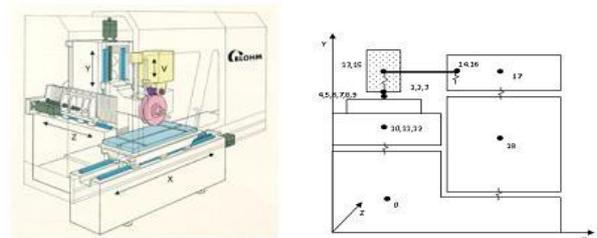


Рис. 6. Компоновка станка и расчетная схема глубинного шлифования

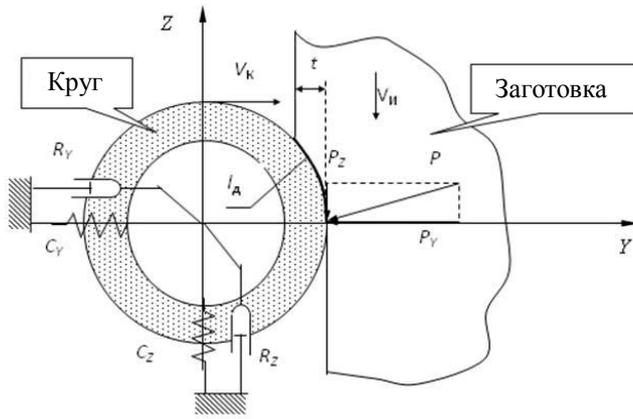


Рис. 7. Схема контакта шлифовального круга с заготовкой

*Модель тепловых процессов.* Абразивные и алмазные круги, применяемые при шлифовании, являются инструментами со стохастическим (вероятностным) расположением множества элементарных режущих зерен. В месте расположения каждого из зерен с материалом заготовки выделяется теплота, возникающая в процессе срезания отдельной стружки. Расположение этих локальных источников тепловыделения на поверхности контакта между заготовкой и кругом в связи со стохастическим размещением зерен непрерывно меняется во времени. Это приводит к выравниванию температур на всей контактной поверхности заготовки. Выравниванию температур содействует также явление самозатачивания. Эти особенности процесса шлифования позволяют при отображении тепловых процессов ориентироваться на схематизированное зерно с некоторыми усредненными геометрическими параметрами и условиями работы (рис. 8).

Математическая модель тепловых потоков в зоне резания эквивалентного зерна определяет температуры в характерных точках зоны резания: стружка, точка контакта стружки с передней поверхностью зерна, режущее зерно, точка контакта зерна с заготовкой, поверхность заготовки. Потоки тепла между ними определяются соответствующими сопротивлениями. В соответствии с методом МПА, полученные математические модели подсистем объединяются в единую эквивалентную схему с помощью установления связей между ними [5].

Используя методы анализа электрических схем, на основе эквивалентной схемы строится математическая модель в виде дифференциальных уравнений. Далее, используя преобразование Лапласа и переходя в область изо-

бражений, получаем математическую модель в виде структурной схемы, которая отражает динамику упругих и тепловых процессов при шлифовании [7].

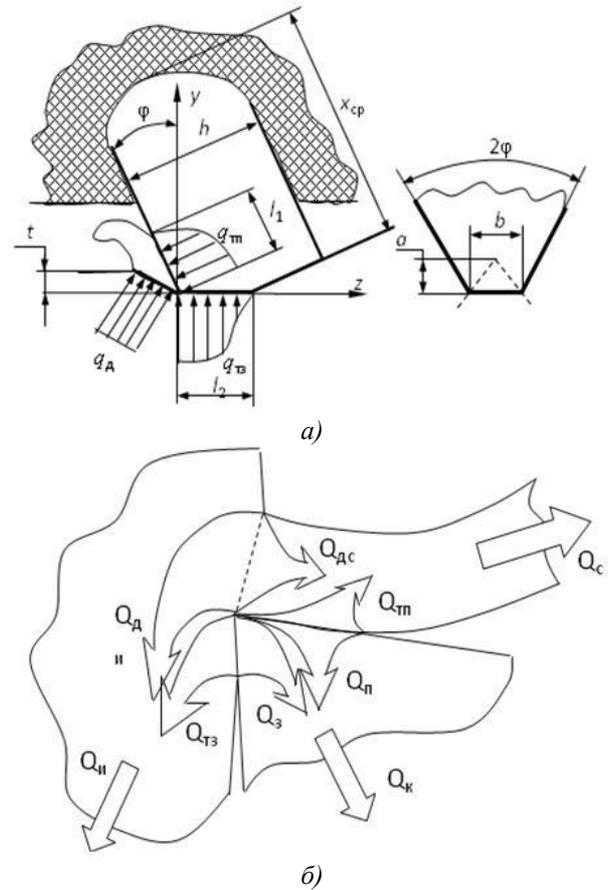


Рис. 8. Режущий выступ зерна и расположение источников тепловыделения (а); схема движения тепловых потоков при шлифовании (б)

Полученные математические модели использовались для исследования процессов глубинного шлифования с помощью оригинальной компьютерной программы PAN.

Математическая модель позволяет в установленном режиме определить силы резания, смещения круга и заготовки в начале резания, температуры в характерных точках и тепловые потоки в зоне резания при заданных исходных режимах резания. По математическим моделям было исследовано поведение термодинамической системы шлифовального станка при переходных процессах и вынужденных колебаниях.

Для обеспечения заданной размерной точности, качества поверхностного слоя, сопротивления усталости лопаток ГТД и максимальной производительности при глубинном шлифовании на многокоординатном станке с ЧПУ необходимо минимизировать количество проходов. Это достигается назначением

научно обоснованных режимов резания и характеристики шлифовального круга при технологической подготовке производства. Для этого нужно спрогнозировать качество каждого из элементарных участков обрабатываемой поверхности при выбранных режимах резания и характеристики круга на основе математического моделирования термодинамических процессов в зоне резания.

При назначении режимов глубинного шлифования лопаток ГТА следует использовать следующие критерии:

– на этапах промежуточных проходов исходить из максимальной производительности процесса обработки (увеличивая фактическую глубину резания), при равенстве параметров шлифования для всех элементарных участков обрабатываемой поверхности (сила резания, величина съема, тепловые потоки и температура в зоне резания), обеспечивающих удале-

ние поврежденного слоя при последующих проходах.

– на заключительном проходе необходимо задавать режимы резания по критическому элементарному участку обрабатываемой поверхности для обеспечения заданных показателей качества поверхностного слоя и заданные эксплуатационные показатели детали (минимизация погрешности, величины разрушенного слоя, шероховатости, наклепа, остаточных напряжений и предела выносливости).

Последовательность действий по обеспечению сопротивления усталости и качества поверхностного слоя при глубинном профильном шлифовании лопаток ГТД представлена в виде алгоритма назначения режимов глубинного шлифования для каждого прохода на основе моделирования процесса обработки и выделения критического элементарного участка поверхности (рис. 9).

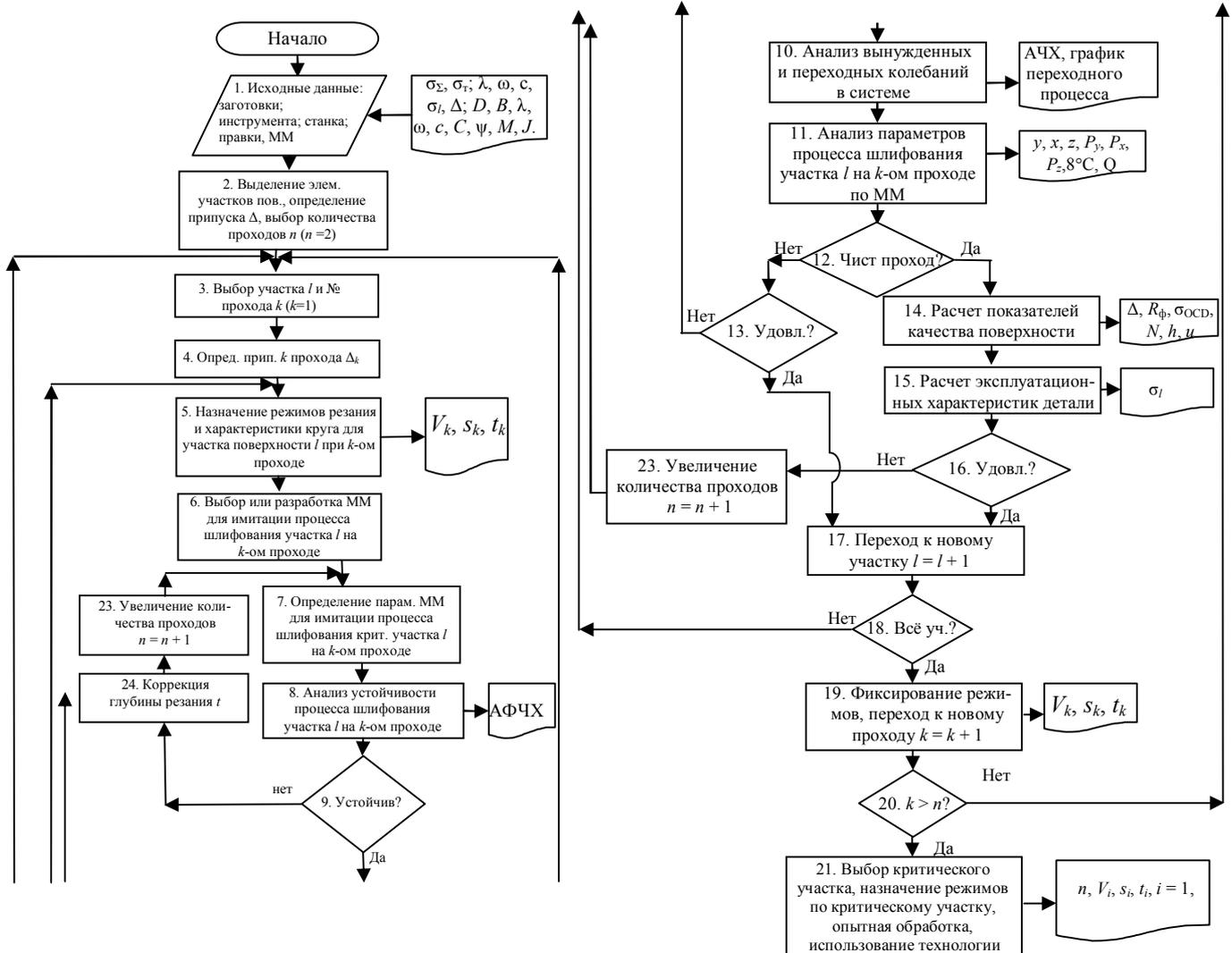


Рис. 9. Алгоритм назначения режимов глубинного шлифования

Первоначально разрабатывается предварительная операционная технология обработки

контура сложного профиля на многокоординатном станке с ЧПУ на основе традицион-

ных, сложившихся методик и имеющегося опыта.

Для прогноза устойчивости процесса и показателей качества поверхностного слоя используется математическая модель термодинамической системы глубинного профильного шлифования, которая учитывает динамику механических, тепловых и рабочих процессов при обработке каждой из элементарных поверхностей сложного профиля [5, 6].

В условиях неустойчивости выполнение обработки или достижение заданных параметров качества невозможно, поэтому требуется корректировка исходной технологии [6]. Для преодоления этой проблемы можно снизить глубину шлифования и производить обработку за несколько проходов, что снижает производительность и эффективность глубинного шлифования. Математическое моделирование позволяет добиться устойчивости процесса глубинного шлифования за счет изменения других параметров обработки, в том числе конструктивных параметров технологической системы, при сохранении максимально возможной производительности. Для выявления уровня устойчивости процесса глубинного шлифования при разных режимах шлифования необходимо использовать расчетные АФЧХ и критерий Найквиста.

После корректировки технологии необходимо уточнить математическую модель и заново проверить систему на устойчивость. При обеспечении устойчивости процесса необходимо на основе математической модели получить статические и динамические характеристики, которые будут определять взаимные смещения шлифовального круга и заготовки, текущую глубину резания, колебания силы шлифования и температур в зоне резания [7, 8].

На основе полученной информации можно выделить лимитирующие участки обрабатываемой поверхности, по которым необходимо задать режимы резания и характеристику круга для осуществления операции профильного глубинного шлифования. При необходимости после глубинного шлифования вводится операция поверхностно-пластического деформирования (ПДД) отдельных участков или всей обрабатываемой поверхности.

### Выводы

1. Разработана методология выбора режимов резания и характеристики круга при профильном глубинном шлифовании на основе выявления критического участка сложной поверхности и прогноза выходных параметров процесса обработки с целью обеспечения за-

данных показателей качества поверхностного слоя и эксплуатационных показателей детали;

2. Изложена методика разработки расчетной схемы и задания параметров реального формообразования при реализации профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ на основе классификации поверхностей и дифференциации исходного профиля на элементарные участки поверхности.

3. Предложен и научно обоснован метод представления профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ в виде взаимосвязанных процессов динамического формообразования: упругих динамических колебаний и тепловых процессов в технологической системе;

4. Разработаны математические модели для определения геометрических, силовых, упругих и тепловых характеристик в зоне резания с учетом вариации режимов резания и характеристики шлифовального круга, условий обработки каждого из элементарных участков поверхности сложного профиля.

5. На основе разработанных моделей создан программный комплекс профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ для прогнозирования результатов формообразования и выбора управляющих параметров, предложен алгоритм расчета на ЭВМ для формализации разнородных процессов глубинного шлифования на основе метода прямой аналогии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учеб. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 320 с.
2. Старков, В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
3. Полетаев, В.А., Волков, Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
4. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1972. – 232 с.
5. Никитин, С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.12. – №4(33). – С. 61–65.
6. Никитин, С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – №8(61). – С. 38–44.
7. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П. Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя ло-

патки при глубинном профильном шлифовании // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – №8(50). – С. 38–44.

8. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии машиностроения. – 2016. – №5(59). – С. 17–24.

## REFERENCES

1. Makarov, V.F. *Modern Methods of Heat-Resistant Steel and Alloys Efficient Abrasion*: manual. – S-Pb.: “Doe” Publishing House, 2013. – pp. 320.

2. Starkov, V.K. *Grinding with High-Porous Disks*. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 688.

3. Poletaev, V.A., Volkov, D.I. *Deep Grinding of Turbine Blades: Technologist’s Library*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.

4. Novoselov, Yu.K. *Surface Shaping Dynamics at Abrasion*. – Saratov: Saratov University Publishing House, 1972. – pp. 232.

5. Nikitin, S.P. Simulation of cutting process at grinding taking into account interaction of elastic and thermal systems // *Bulletin of USATU*. – 2009. – Vol.12. – No.4(33). – pp. 61-65.

6. Nikitin, S.P. Theoretical investigation of stability at grinding // *Bulletin of USATU*. – 2013. – Vol.17. – No.8(61). – pp. 38-44.

7. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Shaping condition impact upon quality of blade surface layer at deep profile grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.8(50). – pp. 38-44.

8. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Quality and productivity increase at deep profile grinding of turbine blades // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.5(59). – pp. 17-24.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 621.914

DOI: 10.12737/article\_5aacd85821ab73.82562382

А.М. Козлов, д.т.н., Г.Е. Малютин, к.т.н.  
(ФГБОУ ВО Липецкий государственный технический университет  
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30)  
E-mail: kam-48@yandex.ru

## Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ

На основе анализа сил резания, действующих в зоне контакта сферической фрезы с обрабатываемой поверхностью, предложены зависимости для определения технологических параметров. Использование полученных зависимостей позволяет повысить производительность объемного фрезерования зон, оставшихся необработанными после полустого фрезерования без использования дополнительных адаптивных устройств.

**Ключевые слова:** объемное фрезерование; необработанные зоны; производительность.

A.M. Kozlov, D. Eng. G.E. Malyutin, Can. Eng.  
(FSBEI HE Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya Str., Lipetsk, Russia, 398055)

## Complex surface finishing control on NC milling machines

On the basis of the analysis of cutting forces operating in the contact area of a ball mill with the surface under machining there are offered dependences for the technological parameters definition. The use of the dependences obtained allows increasing productivity of volumetric milling areas left unprocessed after semifinish milling without use of additional adaptive devices.

**Keywords:** volumetric milling; unprocessed areas; productivity.

Фрезерование на станках с ЧПУ характеризуется постоянным изменением траектории перемещения инструмента, что приводит к изменениям геометрии зоны резания, и как следствие, к непостоянству сил резания и погрешности обработки на разных участках обрабатываемых поверхностей. В наибольшей

степени это проявляется при обработке вогнутых поверхностей, форма которых описывается кривыми второго порядка.

Технологический процесс механической обработки подобных поверхностей, как и любой процесс механической обработки точных поверхностей, разделяется на несколько эта-