

Перспективы дальнейшего развития полученных результатов заключаются в их применении для выбора проектных решений и оценке характеристик технологических систем шлифования и оптимизации параметров обработки для существующих комплексов.

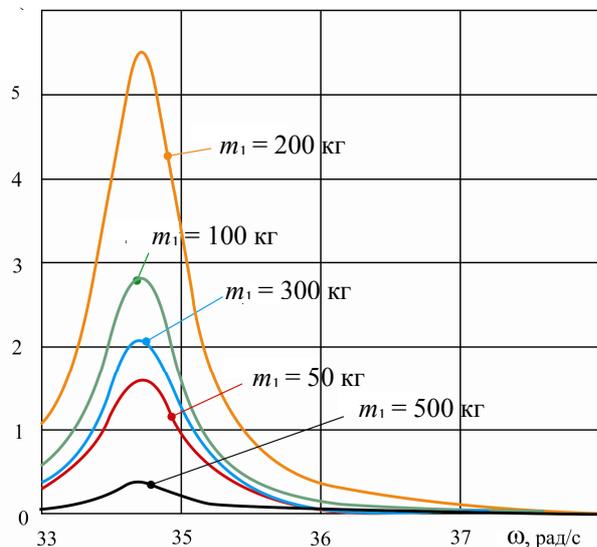


Рис. 4. Энергетический спектр колебаний центра инструмента вызываемый случайными отклонениями профиля шлифовального круга

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. 304 с.
2. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
3. Братан С.М. Модификация динамических соотношений при построении системы автоматизированного управления процессами финишной обработки/ С.М. Братан, Д.А. Каинов, Ю.О. Стреляная // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 6-1. С. 136–141.

REFERENCES

1. Novosyolov Yu.K. *Surface Shaping Dynamics at Abrasion*. Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2012. pp.304.
2. Korchak S.N. *Productivity of Steel Parts Grinding*. M.: Mechanical Engineering, 1974. pp. 280.
3. Bratan S.M. Modification of correlations at formation of finishing control system/ S.M. Bratan, D.A. Kainov, Yu.O. Strelyanaya // *Proceedings of State University of Tula. Technical Sciences*. 2013. Issue 6-1. pp. 136–141.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов

УДК 621.92
DOI: 10.12737/18710

В.Ф. Макаров, д.т.н.,
С.П. Никитин, к.т.н.
А.О. Норин, аспирант
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет),
E-mail: makarovv@pstu.ru

Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток

Представлена методика оценки качества обработки при глубинном профильном шлифовании на многокоординатном станке поверхностей сложной формы. Приведены математические модели для определения параметров пятна контакта шлифовального круга и заготовки при глубинном шлифовании различных поверхностей лопаток, позволяющие прогнозировать съём материала, износ шлифовального круга и шероховатость каждой поверхности на основе режимов резания, характеристики круга, динамики упругих, тепловых и рабочих процессов в технологической системе.

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

V.F. Makarov, D.Eng.,
S.P. Nikitin, Can.Eng.
A.O. Norin, Post Graduate Student
(National Research Polytechnic University of Perm)

Quality and productivity increase at profile creep feed grinding of turbine blades

A new concept of working quality assessment and cutting mode setting at profile creep feed grinding of some complex conju-

gate surfaces simultaneously on a multiaxes NC machine is presented. The analysis of dynamic and thermo-physical phenomena at machining each of the conjugate surfaces grinded simultaneously by one profile abrasive disk is carried out. The simulators for the definition of contact patch parameters of a grinding disk and a billet at a creep feed grinding of different conjugate profile surfaces of turbine and nozzle blades of GTEs allowing the prediction of material removal intensity, grinding disk wear, and roughness of every surface on the basis of changes in cutting modes, disk characteristics, dynamics of elastic, thermal and operation processes in a technological system are shown. This procedure allows controlling the process of profile creep feed grinding to achieve preset parameters of surface quality, dimension accuracy in blade profiles of gas turbine engines, productivity increase and decrease of machining prime cost.

Keywords: machining techniques; creep feed grinding; multiaxis machining; machine dynamic system; dynamic behavior.

Глубинное шлифование применяется главным образом для окончательной обработки плоских и сложно-фасонных поверхностей хвостовиков и полок рабочих и сопловых лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Некоторые схемы обработки глубинным шлифованием различных поверхностей хвостовиков и полок лопаток турбин приведены на рис. 1, 2.

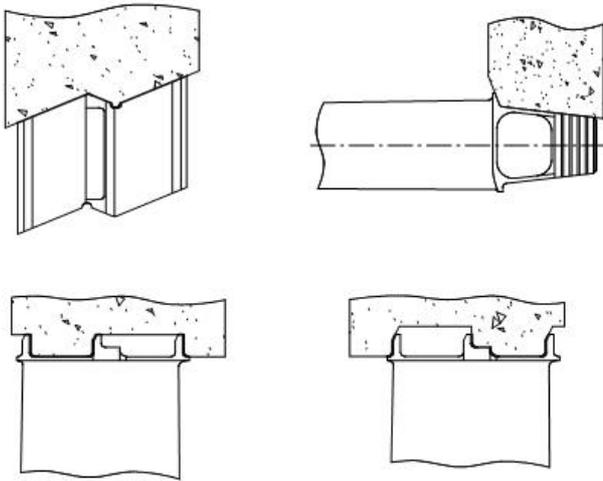


Рис. 1. Схемы глубинного шлифования различных поверхностей рабочих лопаток турбин

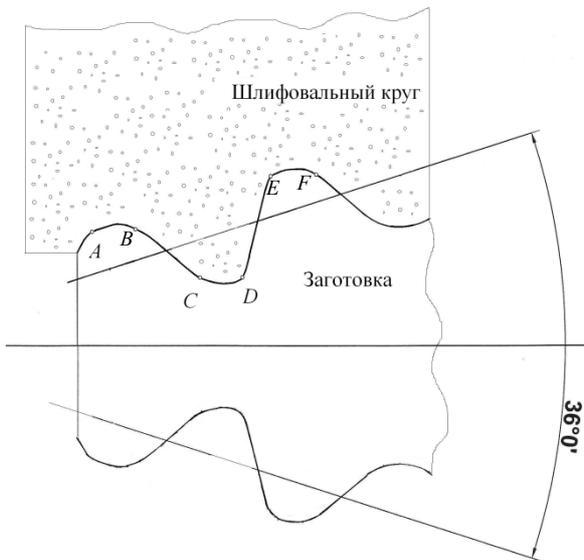


Рис. 2. Схема обработки хвостовика рабочей лопатки турбины

Для повышения точности, гибкости 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 (рис. 3) [1 – 3].

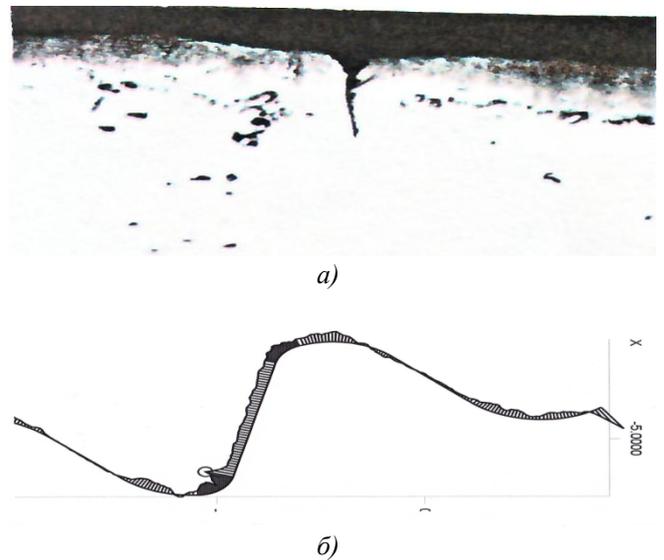


Рис. 3. Микротрещина на поверхности (а) и погрешность профиля (б) при обработке хвостовика

Например, при глубинном шлифовании канавок и полок лопаток, имеющих радиальную и торцовую поверхности, на торцовой поверхности возможно появление трещин. При глубинном шлифовании глубоких и узких спиральных пазов на торцовой поверхности большего диаметра также возможны прижоги и трещины. Для обеспечения заданной размерной точности и качества поверхностного слоя при обработке лопаток ГТД приходится реализовывать множество проходов [1], что снижает производительность глубинного шлифования.

Задача заключается в том, чтобы при многокоординатной обработке глубинным профильным шлифованием установить такие режимы резания и характеристики шлифоваль-

ного круга, которые бы обеспечили заданные параметры качества поверхностей, размерную точность и максимальную производительность. Для этого нужно знать влияние режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей.

При глубинном профильном шлифовании контура сложной формы одновременно формируются несколько различных поверхностей. Можно выделить несколько характерных видов поверхностей, которые определяют форму элементов лопаток: при обработке полок лопаток (см. рис. 1) формируются в основном плоские и торцовые поверхности; при обработке хвостовика (см. рис. 2) формируются боковые

поверхности профиля (BC , DE), радиусные выступы (AB , EF) и впадины (CD) профиля.

К этим поверхностям предъявляются заданные требования по точности расположения и качеству поверхностного слоя. При их одновременной обработке создаются различные условия реализации процесса шлифования. Наблюдается варьирование режимов резания, припусков, пятен контакта шлифовального круга с заготовкой и т.д. Это приводит к различию сил резания, действующих на зерно; упругих и динамических деформаций; величины съема; температур в зоне контакта, которые определяют размерную точность и качество поверхностного слоя (рис. 4) [1 – 3].



Рис. 4. Причинно-следственные связи условий обработки и качества поверхностного слоя при глубинном шлифовании

Исходя из этого, возникает вопрос, какие режимы шлифования и характеристику круга необходимо задать, чтобы обеспечить приемлемые размерную точность и качество поверхностного слоя.

Обработку сложных поверхностей лопаток можно представить как композицию простых схем профильного шлифования: плоского шлифования периферией круга, плоского шлифования торцом круга и профильное шлифование методом копирования.

Кинематическое различие данных схем шлифования сводится к вариации пятна контакта шлифовального круга и заготовки [1]. Поэтому необходимо оценить различие параметров качества данных поверхностей при разных схемах шлифования, определяющих

разное пятно контакта шлифовального круга и заготовки. Прежде всего, требуется оценить величину съема материала при обработке поверхности Δr , и вероятность съема материала $p(m)$; шероховатость поверхности Ra ; критерий износа шлифовального круга R_z [4].

Величина съема и шероховатость поверхности взаимосвязаны и определяются кинематикой взаимодействия шлифовального круга и заготовки.

Эта взаимосвязь имеет вид:

$$t_{\phi} = R_z + \Delta r, \quad (1)$$

где t_{ϕ} – фактическая глубина микрорезания; Δr – величина съема материала при обработке поверхности, измеренная перпендикулярно к обработанной поверхности; R_z – средняя высота микронеровностей шероховатости.

Максимальная глубина микрорезания зависит от состояния динамической системы станка, рабочего и теплового процессов и может быть определена как сумма составляющих общей деформации системы:

$$t_{\phi} = r + \Delta r_T - \Delta r_C + R - \Delta R_T - \Delta R_C - A_0, \quad (2)$$

где r, R – начальные параметры заготовки и круга; $\Delta r_T, \Delta R_T$ – температурные деформации заготовки и круга; $\Delta r_C, \Delta R_C$ – упругие деформации заготовки и круга; A_0 – параметр, определяющий положение шлифовального круга относительно заготовки.

Относительное положение шлифовального круга и заготовки будет определяться следующим выражением:

$$A_0 = A_H + \Delta A_C + \Delta A_T + \Delta A_D, \quad (3)$$

где A_H – настроечный параметр относительного положения шлифовального круга и заготовки, определяющий заданную глубину обработки; ΔA_C – упругие деформации системы СПИЗ с учетом рабочего процесса; ΔA_T – температурные деформации системы СПИЗ; ΔA_D – динамические деформации системы СПИЗ.

Все слагаемые уравнений (2), (3) являются случайными функциями и определяются динамическими процессами в технологической системе. Для их определения целесообразно использовать комплексную математическую модель, учитывающую взаимодействие данных процессов [5].

Величина съема материала Δr с учетом случайного расположения зерен в шлифовальном круге и случайности резов отдельных зерен может быть рассчитана по выражению [2]:

$$\Delta r = \frac{t_{\phi}^2}{1,478t_{\phi} + \frac{13,66v_{и}}{K_C(v_K \pm v_{и})n_3\sqrt{D_{\phi}\rho_3}}}, \quad (4)$$

где v_K – скорость шлифовального круга; $v_{и}$ – скорость заготовки; K_C – коэффициент стружкообразования; n_3 – среднее число режущих зерен на единице поверхности круга; D_{ϕ} – эквивалентный диаметр; ρ_3 – радиус закругления вершин абразивных зерен.

Коэффициент стружкообразования учитывает пластические деформации при резании зерном, которые снижают долю удаляемого материала. Приблизительно его можно найти как $K_C = 0,66t_{\phi}^{0,38}$ [2].

Среднее число режущих зерен на единице поверхности круга n_3 , средняя глубина среза

единичным зерном z_3 и площадь пятна контакта шлифовального круга с заготовкой являются основными характеристиками абразивной обработки. Пятно контакта шлифовального круга с заготовкой определяет эквивалентный диаметр D_{ϕ} и длину зоны контакта шлифовального круга с заготовкой l_k . Среднее число режущих зерен на единице поверхности круга определяется случайным расположением зерен в шлифовальном круге и рассчитывается на основе принятого закона распределения [2, 4].

Площадь пятна контакта шлифовального круга с заготовкой определяется кинематикой процесса обработки или схемами шлифования. Для ряда характерных видов шлифования получены простые зависимости параметров (Э.Ф. Капанец, В.К. Старков, В.А. Полетаев, В.Ф. Безъязычный, А.Н. Резников, Е.П. Калинин, W. Dietrich).

При определении параметров пятна контакта будем исходить из того, что в резании участвуют в основном режущие зерна, расположенные непосредственно на рабочей поверхности инструмента и имеющие площадки износа, а зерна, лежащие в глубине, практически не участвуют в срезании металла (1...2 % от общего объема) [6].

Площадь пятна контакта для плоского шлифования периферией круга (рис. 5) с учетом радиусной поверхности на кромке будет определяться выражением

$$F_k = l_k b_k, \quad (5)$$

где $l_k = \sqrt{D_{кр} t_{\phi}}$ – длина контакта; t_{ϕ} – фактическая глубина резания; b_k – ширина контакта с учетом радиусной поверхности на кромке (с погрешностью менее 1 % можно принять $b_k = 1,1 S_{\text{пол}}$).

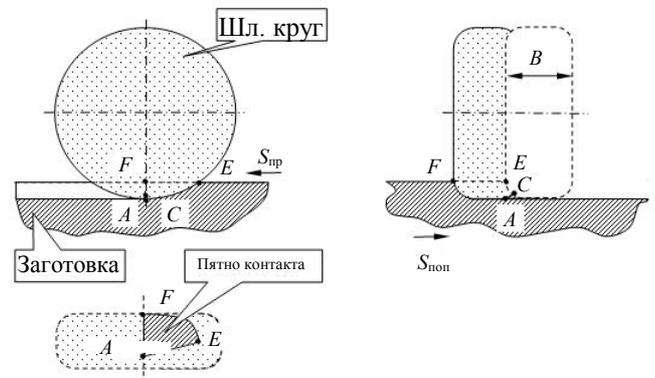


Рис. 5. Пятно контакта при плоском шлифовании периферией круга

Средняя глубина среза единичным зерном

при плоском шлифовании периферией круга составит

$$a_z = \frac{S_{пр} L}{60 v_{кр}} \sqrt{\frac{t_{\phi}}{D_{кр}}}, \quad (6)$$

где L – расстояние между режущими зёрнами в направлении главного движения.

Данное выражение справедливо для глубинного и обычного многопроходного шлифования. При врезном шлифовании вместо продольной подачи $S_{пр}$ следует подставлять величину ширины шлифования b или величину шлифовального круга B .

При плоском шлифовании торцом круга формообразование срезов существенно отличается от шлифования периферией круга, так как при шлифовании торцом круга движение продольной подачи происходит под углом к направлению главного движения, а при шлифовании периферией круга движение продольной подачи и главного движения совпадают (попутное шлифование) или противоположны (встречное шлифование). При шлифовании торцов канавки или полки ширина шлифуемой части заготовки b_1 будет располагаться сбоку от шлифовального круга относительно хода его движения (рис. 6). При этом ширина среза будет увеличиваться от нуля до максимума.

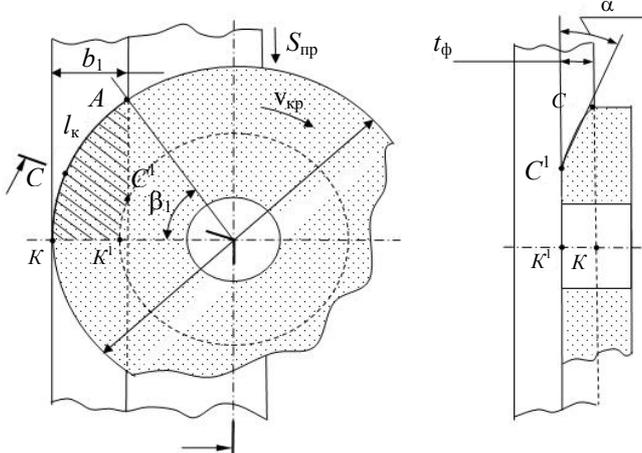


Рис. 6. Пятно контакта при плоском шлифовании торцом круга

Длина контактной линии шлифовального круга и заготовки равна

$$l_k = \sqrt{b_1 D_{кр}} \quad (7)$$

Ширина контакта шлифовального круга и заготовки равна

$$b_k = \frac{t_{\phi}}{\sin \alpha} \quad (8)$$

Угол α обусловлен изменением геометрии рабочей зоны круга по мере износа. После стабилизации износа среднее значение угла $\alpha \approx 8^\circ$. На начальном этапе обработки и при непрерывной правке шлифовального круга $\alpha \approx 90^\circ$, и можно принимать

$$b_k = t_{\phi} \quad (9)$$

Средняя толщина резания отдельным зерном равна

$$a_z = \frac{a_{z \max}}{2} = \frac{S_{пр} L}{2 \cdot 60 \cdot v_{кр}} \sin \alpha \sin \beta_1, \quad (10)$$

где $\beta_1 = \frac{360}{\pi} \sqrt{\frac{b_1}{D_{кр}}}$.

Формирование елочного профиля лопатки производится методом копирования, при котором фасонный профиль абразивного круга воспроизводится на обрабатываемой заготовке. Кинематика абразивной обработки елочного профиля методом копирования аналогична шлифованию резьбы или зубьев зубчатых колес [6] и сводится к схеме плоского шлифования периферией круга (рис. 7).

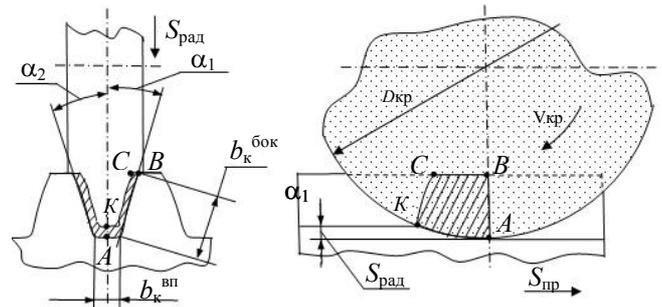


Рис. 7. Пятно контакта при шлифовании методом копирования

Длина контактной линии шлифовального круга и заготовки для каждой боковой поверхности и впадины канавки равна

$$l_k = \sqrt{S_{рад} D_{кр}} \quad (11)$$

Ширина контакта шлифовального круга и заготовки равна:

– для каждой боковой поверхности

$$b_k = b_k^{бок}, \quad (12)$$

– для впадины канавки

$$b_k = b_k^{вп} \quad (13)$$

Фактическая глубина резания будет определяться выражениями:

– для каждой боковой поверхности

$$t_{\phi} = S_{рад} \sin \alpha_i, \quad (14)$$

– для впадины канавки

$$t_{\phi} = S_{рад} \quad (15)$$

Средняя толщина резания отдельным зерном:

– для боковых поверхностей канавок

$$a_z^{бок} = \frac{S_{пр} L}{60 v_{кр}} \sqrt{\frac{t_\phi}{D_{кр}}} = \frac{S_{пр} L}{60 v_{кр}} \sqrt{\frac{S_{рад} \sin \alpha_i}{D_{кр}}}, \quad (16)$$

– для впадины канавки

$$a_z^{вп} = \frac{S_{пр} L}{60 v_{кр}} \sqrt{\frac{t_\phi}{D_{кр}}} = \frac{S_{пр} L}{60 v_{кр}} \sqrt{\frac{S_{рад}}{D_{кр}}} \quad (17)$$

Для обеспечения заданных значений качества, размерной точности и производительности при глубинном профильном шлифовании лопаток газотурбинных двигателей на многокоординатных станках необходимо обеспечивать равные показатели по съему, слою микронеровностей и износу круга по каждой поверхности за счет выбора оптимальных режимов резания и характеристик круга. Можно указать следующую последовательность действий по обеспечению размерной точности и качества поверхностного слоя при глубинном профильном шлифовании лопаток ГТД (рис. 8) [4, 7].

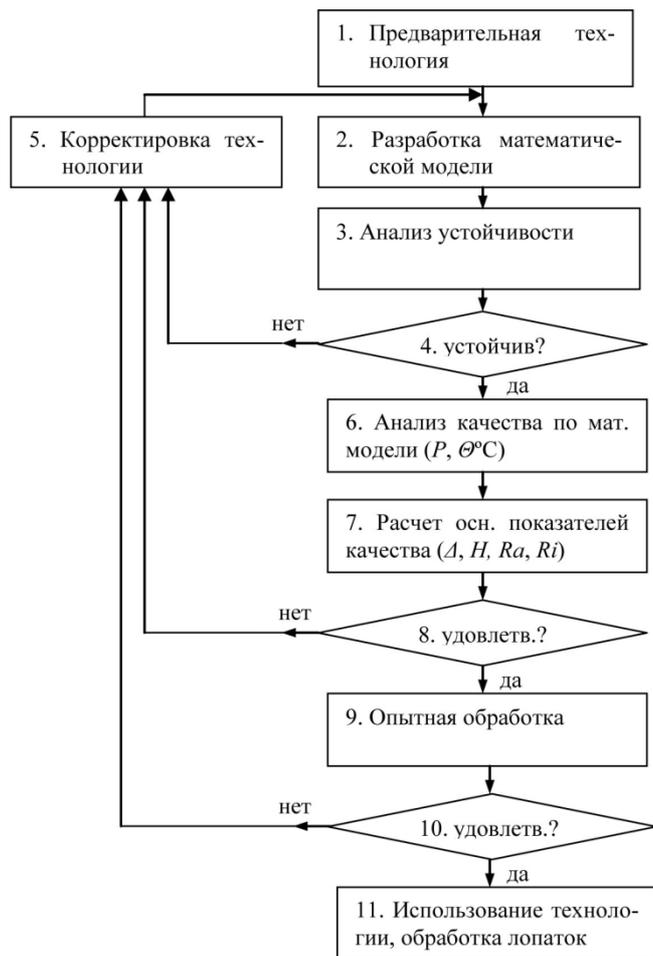


Рис. 8. Алгоритм действий по обеспечению качества глубинного профильного шлифования лопаток

На первом этапе разрабатывается предварительная операционная технология обработки контура сложного профиля на многокоординатном станке с ЧПУ. Выбирается схема, назначаются режимы резания, выбирается характеристика круга на основе традиционных, сложившихся методик.

1) Из условия обеспечения заданной шероховатости поверхностей определяется зернистость шлифовального круга. Зернистость должна обеспечивать шероховатость не выше допустимой шероховатости:

$$Ra \leq Ra_{max},$$

где Ra_{max} – максимально допустимое значение шероховатости.

При этом решается задача обеспечения снятия стружки, то есть фактическая глубина микрорезания должна быть больше граничной, определяющей переход от пластического деформирования к удалению слоя материала. Обычно она задается относительно радиуса закругления зерна:

$$t_\phi \geq \xi_{кр} \cdot \rho_z,$$

где ρ_z – радиус закругления зерна; $\xi_{кр}$ – критическое значение соотношения глубины микрорезания к радиусу закругления, определяющее переход от пластического деформирования к удалению слоя материала.

Одновременно фактическая глубина микрорезания не должна быть больше допустимой и приводить к интенсивному разрушению абразивных зерен.

$$t_\phi \leq \psi_{кр} \cdot \rho_z,$$

где $\psi_{кр}$ – критическое значение соотношения глубины микрорезания к радиусу закругления, определяющее начало интенсивного разрушения абразивных зерен.

2) Выбирается структура абразивного инструмента из условия размещения стружки в межзерновом пространстве:

$$W_c \leq W_\Pi,$$

где W_c – объем стружки; W_Π – объем межзернового пространства и пор.

3) Выбирается твердость инструмента из условия обеспечения заданного физико-механического состояния поверхностного

слоя заготовки. Физико-механическое состояние поверхностного слоя заготовки будет определяться, прежде всего, температурами в зоне резания:

$$\theta \leq \theta_{\text{пр}},$$

где θ – температура поверхностного слоя при шлифовании заготовки; $\theta_{\text{пр}}$ – предельно допустимая температура поверхностного слоя.

Для ограничения температуры поверхностного слоя на первом этапе следует обеспечить своевременное разрушение и вырывание зерен из связки круга при изнашивании, для этого предельно допустимые силы резания при изнашивании были больше сил со стороны связки, удерживающих зерно в круге.

На втором этапе разрабатывается математическая модель теплодинамической системы глубинного профильного шлифования, которая учитывает динамику механических, тепловых и рабочих процессов [7].

Третий этап связан с использованием полученной математической модели для изучения условий осуществления процесса глубинного шлифования. Как известно, с увеличением глубины процесс шлифования может становиться неустойчивым [6]. В условиях неустойчивости выполнение обработки или достижение заданных параметров качества невозможно, поэтому требуется корректировка исходной технологии (этап 5). 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.

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 A_0 (3), текущую глубину резания $t_{\text{ф}}$ (2), коле-

бания силы P и температур в зоне резания θ_i (этап 6).

Выводы

При профильном глубинном шлифовании сложных профилей лопаток необходимо учитывать различие условий шлифования отдельных элементов профиля, которые вызывают колебания в технологической системе, изменения съема материала и приводят к снижению размерной точности, качества поверхностного слоя заготовки.

Различие условий шлифования элементов сложного профиля проявляется в режимах резания, реализуемых схемах шлифования и разных параметрах пятна контакта шлифовального круга и заготовки.

Предложенные модели для расчета параметров контакта могут быть использованы при исследовании особенностей динамики тепловых процессов при глубинном шлифовании лопаток. Это позволит изучать влияние условий глубинного шлифования поверхностей сложного профиля на тепловые процессы в зоне обработки, на относительные смещения шлифовального круга и заготовки из-за динамических явлений и задавать оптимальные режимы резания и характеристику круга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 320 с.
2. Полетаев В.А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
3. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
4. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовского 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. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. 358 с.
7. Макаров В.Ф., Никитин С.П. Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя лопатки при глубинном профильном шлифовании // Научно-

ные технологии в машиностроении. 2015. №8 (50). С. 38–44.

REFERENCES

1. Makarov V.F. *Current Methods in High-performance Abrasion of Heat-resistant Steel and Alloy: Textbook*. S-Pb.: Publishing House "Lan", 2013. pp. 320.
2. Poletaiev V.A., Volkov D.I. *Turbine Blade Creep Feed Grinding: Technologist's Library*. M.: Mechanical Engineering, 2009. pp. 272.
3. Starkov V.K. *Grinding with Highly Porous Disks*. M.: Mechanical Engineering, 2007. pp. 688.
4. Novosyolov Yu.K. *Dynamics in Surface Shaping at Abrasion*. Saratov: Publishing House of the University of Saratov, 1972. pp. 232.

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

6. Kalinin E.P. *Theory and Practice in Control of Grinding Productivity without Burns and Taking into Account Tool Dulling*. S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2009. pp. 358.

7. Makarov V.F., Nikitin S.P. Impact of shaping conditions upon blade surface layer quality at profile creep grinding // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. 2015. №8 (50). pp. 38–44.

Рецензент д.т.н. В.А. Полетаев

УДК 621.922

DOI: 10.12737/18711

Б.М. Бржозовский, д.т.н.,

А.В. Славин, к.т.н.

(ФГБОУ Саратовский государственный технический университет

им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов,

ул. Политехническая, 77, 410054, Россия)

E-mail: bmsar852@mail.ru

Повышение эффективности шлифования путем управления физико-химическими процессами в контакте «инструмент – заготовка»

Рассмотрены пути повышения эффективности шлифования путем управления физико-химическим процессом в контакте «круг-заготовка». Показано влияние физико-химических свойств СОЖ на основные показатели шлифования. Предложена иерархическая пороговая структура процесса шлифования на основе нейросетевой модели, позволяющая автоматизировать проектирование технологии обработки.

Ключевые слова: шлифование; смазочно-охлаждающая жидкость; режущая способность; износ.

B.M. Brzhozovsky, D.Eng.,

A.V. Slavin, Can.Eng.

(FSBEI Gagarin State Technical University of Saratov,

77, Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054, Russia)

Grinding efficiency increase through physical-chemical processes control in “tool – billet” contact

The ways to increase grinding effectiveness by means of physical–chemical process control in a “disk-billet” contact are considered. The impact of physical-chemical properties of cutting emulsion (CE) upon grinding basic indices is shown. The hierarchical threshold structure of a grinding process based on a neuronet model allowing automating the machining techniques designing is offered.

Keywords: grinding; cutting emulsion; cutting power; wear.