

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТКИ ПРИ ГЛУБИННОМ ПРОФИЛЬНОМ ШЛИФОВАНИИ

© 2015

В.Ф. Макаров, доктор технических наук, профессор

С.П. Никитин, кандидат технических наук, доцент

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь (Россия)

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

Аннотация: Представлена методика системного анализа качества обработки поверхностей при глубинном профильном шлифовании на многокоординатном станке профилей сложной формы. Предложены алгоритм действий по обеспечению качества глубинного профильного шлифования лопаток, математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка в виде структурной схемы при учете процесса резания. Алгоритм предполагает выяснение динамического состояния технологической системы на основе математической модели теплодинамической системы шлифовального станка с учетом динамики упругих, тепловых и рабочих процессов. Динамическое состояние технологической системы определяет условия осуществления процесса глубинного шлифования. Как известно, с увеличением глубины процесс шлифования может становиться неустойчивым. В условиях неустойчивости выполнение обработки или достижение заданных параметров качества невозможно. 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 и температур в зоне резания. Далее приведенная математическая модель позволяет спрогнозировать съем материала, износ шлифовального круга и шероховатость каждой поверхности на основе режимов резания, характеристики круга, динамики упругих, тепловых и рабочих процессов в технологической системе. Знание влияния режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей позволяет аналитически определить наиболее оптимальные характеристики круга и режимы шлифования для обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя лопатки газотурбинного двигателя: шероховатость поверхности, физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения), точность. Данная методика позволяет управлять процессом глубинного профильного шлифования для достижения заданных параметров качества поверхностей, размерной точности профиля лопаток газотурбинных двигателей и повышения производительности обработки на многокоординатном станке профилей сложной формы.

Для окончательной обработки лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) широко используется глубинное профильное шлифование. 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 [1–5]. 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 шлифовального круга, которые бы обеспечили заданные параметры качества поверхностей, размерную точность и максимальную производительность. Для этого нужно учесть влияние режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей [3; 6].

При глубинном профильном шлифовании контура сложной формы одновременно формируется несколько различных поверхностей, которые определяют форму элементов лопаток (рис. 1): плоские, торцовые, радиусные поверхности и их комбинации. К этим поверхностям предъявляются заданные требования по точности расположения и качеству поверхностного слоя. При их одновременной обработке создаются различные условия реализации процесса шлифования: варьирование

режимов резания, припусков, длины контакта шлифовального круга с заготовкой и др. 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 [1–3; 6]. Поэтому возникает вопрос, какие режимы шлифования и характеристику круга необходимо задать, чтобы обеспечить приемлемые размерную точность и качество поверхностного слоя.

Знание влияния режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей позволяет аналитически определить наиболее оптимальные характеристики круга и режимы шлифования для обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя лопатки ГТД: шероховатость поверхности, физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения), точность [4; 6; 7]. Математически данную задачу можно сформулировать в виде системы неравенств (1).

Первые два неравенства определяют обеспечение заданных параметров шероховатости R_a , где β_R , α_R – максимально и минимально допустимые параметры шероховатости.

$$\left. \begin{aligned} R_a &\leq \beta_R; \quad R_a \geq \alpha_R \\ \sum_i \Delta R &\leq \Delta R_{\text{пр}}; \quad \theta \leq \theta_{\text{пр}} \\ t_{\phi} &\geq \xi_{\text{кр}} \cdot \rho_3; \quad t_{\phi} \leq \psi_{\text{кр}} \cdot \rho_3 \\ \eta \cdot W_c &\leq W_{\text{п}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Параметр точности поверхностей при глубинном профильном шлифовании будет определяться сохранением формы круга при шлифовании, т. е. радиальным износом $\Sigma\Delta R$, который должен быть примерно равным при обработке разных поверхностей сложного профиля лопатки и не должен превышать допустимый уровень $\Delta R_{пр}$.

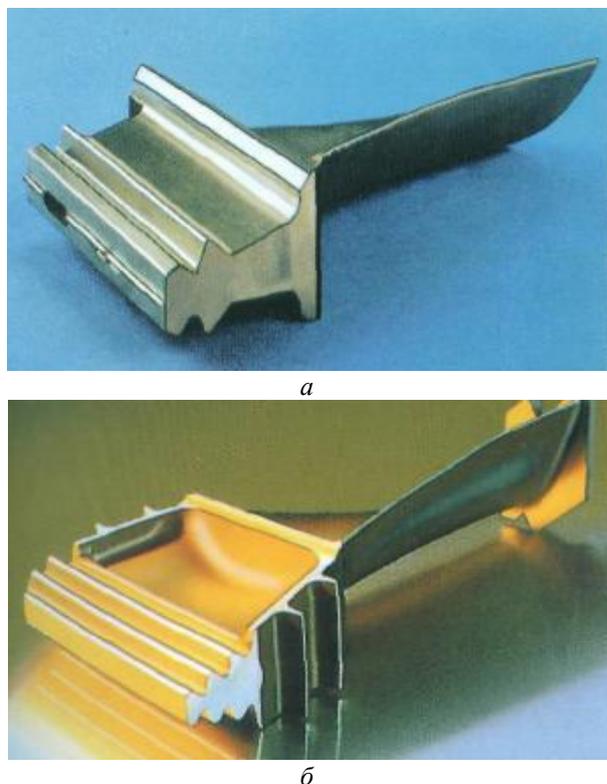


Рис. 1. Общий вид рабочих лопаток турбины: а – без бандажной полки, б – с бандажной полкой

Необходимо физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения) поверхностного слоя, исключающее появление прижогов и трещин, прежде всего, нужно ограничивать температуру в зоне шлифования $\theta \leq \theta_{пр}$.

Помимо этого характеристика шлифовального круга должна обеспечивать оптимальные условия для стружкообразования: требуемые величину микрорезания зерен круга $t_{ф}$ и объем пространства между зерен для размещения стружки W_c . Глубина микрорезания должна быть больше минимальной $\xi_{кр} \cdot \rho_3$, обеспечивающей сьем материала, и меньше предельной $\psi_{кр} \cdot \rho_3$, при которой происходит интенсивное удаление или разрушение зерен. Предельные значения определяются в виде величины по отношению к радиусу закругления зерен ρ_3 .

Для обеспечения заданных значений качества, размерной точности и производительности при глубинном профильном шлифовании лопаток газотурбинных двигателей на многокоординатных станках можно предложить следующий алгоритм действий (рис. 2).

На первом этапе разрабатывается предварительная операционная технология обработки контура сложного профиля на многокоординатном станке с ЧПУ. Выби-

рается схема, назначаются режимы резания, выбирается характеристика круга на основе традиционных, сложившихся методик. На втором этапе разрабатывается математическая модель теплодинамической системы глубинного профильного шлифования, которая учитывает динамику механических, тепловых и рабочих процессов [8–18]. 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 [10; 19–21].

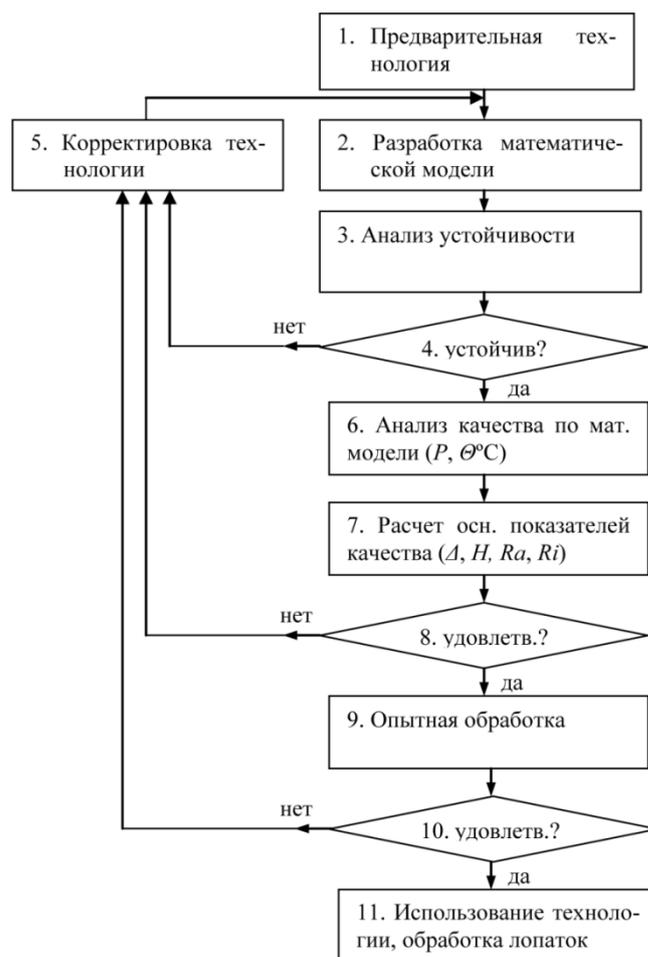


Рис. 2. Алгоритм действий по обеспечению качества глубинного профильного шлифования лопаток

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 [20; 21], которые будут определять взаимные смещения шлифовального круга и заготовки, текущую глубину резания t_{ϕ} , колебания силы и температур в зоне резания θ_i (этап 6).

На этапе 7 определяются основные показатели размерной точности и качества поверхностного слоя для каждой из обрабатываемых поверхностей с учетом схемы шлифования (круглое, торцовое шлифование, плоское шлифование периферией круга). Рассчитывают величину съема материала, вероятность удаления материала, величину слоя микронеровностей, среднее арифметическое отклонение профиля, оценивают величину износа круга по каждой обрабатываемой поверхности [7].

При удовлетворении заданных требований размерной точности и качества поверхностного слоя по каждой из обрабатываемых поверхностей, образующих профиль сложного контура лопатки, необходимо провести пробную обработку заготовки по выбранной технологии (этап 9). Если контроль подтверждает достижение требуемых параметров качества лопатки, то данная технология используется для дальнейшей обработки (этап 11). При этом использование многокоординатных станков с ЧПУ сокращает время и затраты на технологическую подготовку производства.

Предложенная методика позволяет определять данные показатели для каждой поверхности при абразивной обработке сложного контура в условиях самозатачивания на основе исходных значений характеристики шлифовального круга, режимов резания, физико-механических свойств материала и динамического состояния системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ).

Для выяснения динамического состояния системы СПИЗ целесообразно математическое моделирование процесса глубинной обработки с учетом динамики упругих, тепловых и рабочих процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.310016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства» от 12.02.13 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. СПб.: Лань, 2013. 320 с.
- Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
- Полетаев В.А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
- Капанец Э.Ф., Кузьмич К.К., Прибыльский В.И., Тилигузов Г.В. Точность обработки при шлифовании. Минск: Наука и техника, 1987. 152 с.
- Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. СПб.: Лань, 2010. 304 с.

- Безъязычный В.Ф. Определение технологических условий обработки, обеспечивающих заданную величину предела выносливости материала исследуемых образцов // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 8. С. 3–8.
- Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1972. 232 с.
- Никитин С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12. № 4. С. 61–65.
- Никитин С.П. Моделирование динамики процесса механической обработки с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем станка // СТИН. 2008. № 6. С. 8–13.
- Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
- Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
- Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
- Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
- Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
- Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. М.: Машиностроение, 1963. 198 с.
- Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки. Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
- Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск: Выш. шк., 1990. 512 с.
- Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
- Никитин С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 8. С. 38–44.
- Tawakoli T. HochleistungsFlachschleifen – Technologie, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1988. 137 s.
- Dietrich W. Analyse selbsterregter Schwingungen beim Aussenrund-Einsteichschleifen: diss. Braunschweig, 1984. 164 s.

REFERENCES

- Makarov V.F. *Sovremennye metody vysokoэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов* [Modern methods of high-performance abrasion of resistant steels and alloys]. S. Peterburg, Lan' publ., 2013, 320 p.
- Starkov V.K. *Shlifovanie visokoporistimi krugami* [Grinding with highly porous grinding circles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007, 688 p.
- Poletaev V.A., Volkov D.I. *Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin* [Deep grinding of turbine blades]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2009, 272 p.
- Kapanets E.F., Kuzmich K.K., Pribylskiy V.I., Tiliguzov G.V. *Tochnost obrabotki pri shlifovanii* [Pro-

- cessing accuracy in grinding]. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1987, 152 p.
5. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. *Teoriya i praktika povisheniya effektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of increasing the efficiency of materials grinding]. S. Peterburg, Lan' publ., 2010, 304 p.
 6. Bezjazychnyi V.F. Calculation of processing conditions to provide required value of fatigue strength of the material studied samples. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2014, no. 8, pp. 3–8.
 7. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of surface shaping in grind process]. Saratov, Saratovskiy universitet publ., 1972, 232 p.
 8. Nikitin S.P. Modeling of cutting operation in grinding subject to coupling elastic and thermal systems. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 61–65.
 9. Nikitin S.P. Modeling of machining process dynamics with reporting the interaction of elastic and thermal systems of the machine. *STIN*, 2008, no. 6, pp. 8–13.
 10. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1967, 360 c.
 11. Kedrov S.S. *Kolebaniya metallorezhushchikh stankov* [Fluctuations in metal-cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978, 199 p.
 12. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of processes of materials machining]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 279 p.
 13. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovie protsessi v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 288 p.
 14. Reznikov A.N. *Teplofizika rezaniya* [Thermophysics of cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1969, 288 p.
 15. Reznikov A.N. *Teploobmen pri rezanii i okhlazhdenii instrumentov* [Heat transfer in cutting and cooling of tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1963, 198 p.
 16. Yakimov A.V., Slobodyanik P.T., Usov A.V. *Teplofizika mekhanicheskoy obrabotki* [Thermophysics of machining]. Odessa, Lybid' publ., 1991, 240 p.
 17. Yashcheritsin P.I. *Teoriya rezaniya. Fizicheskie i teplovie protsessi v tekhnologicheskikh sistemakh* [Theory of cutting. Physical and thermal processes in technological systems]. Minsk, Visheyskaya shkola publ., 1990, 512 p.
 18. Popov V.M. *Teploobmen v zone kontakta razyemnykh i nerazyemnykh soedineniy* [Heat transfer in the contact zone of detachable and permanent joints]. Moscow, Energiya publ., 1971, 216 p.
 19. Nikitin S.P. Theoretical study of stability when processing by grinding. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 8, pp. 38–44.
 20. Tawakoli T. *HochleistungsFlachschleifen – Technologie, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz*. Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1988, 137 s.
 21. Dietrich W. *Analyse selbsterregter Schwingungen beim Aussenrund-Einsteichschleifen*: diss. Braunschweig, 1984, 164 s.

QUALITY MANAGEMENT OF THE BLADES SURFACE LAYER UNDER DEEP PROFILE GRINDING

© 2015

V.F. Makarov, Doctor of Engineering, Professor
S.P. Nikitin, candidate of technical sciences, Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University, Perm (Russia)

Keywords: processing technology; deep grinding; multiaxis machine; machine dynamic system; dynamic behavior.

Abstract: The article provides the system oriented analysis regarding surface treatment quality after deep profile grinding of complex shapes on a multiaxis machine. This method implies using an algorithm of actions to ensure the quality of deep profile grinding of blades, a mathematical model of heat-dynamic system of a grinding machine in a block diagram form, taking into account the cutting process. The algorithm involves elucidation of the dynamic state of a technological system based on the mathematical model of heat-dynamic system of the grinding machine with consideration of dynamics of elastic, thermal and working processes. The dynamic state of the technological system determines the conditions of deep grinding process. As it is well known, with increasing depth the grinding process can become unstable. In conditions of instability, execution or achievement of specified quality parameters is impossible. To ensure stability of the process it is necessary to receive on the basis of a mathematical model the static and dynamic characteristics which will define the mutual displacement of the grinding disk and a workpiece, the current cutting depth, strength and temperature fluctuations in the cutting zone. The proposed mathematical model allows predicting the removal of material, grinding disk wear and roughness of each surface, based on the cutting modes, characteristics of the disk, dynamics of elastic, heat and work processes in the technological system. Knowledge of the impact of the cutting modes and disk characteristics on the quality of each of the treated surfaces enables to determine analytically the optimal characteristics of the grinding disk and grinding modes to ensure the specified quality parameters of the surface layer of the gas turbine engine blades: surface roughness, physical and mechanical condition (cold hardening, residual stresses), accuracy. This technique allows managing the process of deep profile grinding to achieve the desired surface quality parameters, dimensional accuracy of the profile of the gas turbine engines blades, and increase of processing performance on multi-axis machine of complex shape profiles.