

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА И ПРОЦЕССА ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Макаров В. Ф., Никитин С. П. (ПНИПУ, г. Пермь, Россия)

Abstract: *This article provides theoretical research results regarding stability in case of gas turbine engine blades deep grinding. The surface grinding machine thermodynamic model is used. It takes into account how machine dynamic system characteristics impact on stability and endurance limit of gas turbine engine blades.*

Для изготовления рабочих и сопловых лопаток турбины газотурбинных двигателей (ГТД) используют жаропрочные литейные никелевые сплавы. Для обработки базовых поверхностей лопаток ГТД широко используют глубинное профильное шлифование на многокоординатных станках. 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], что снижает качество и предел выносливости σ_{-1} лопаток. Для обеспечения заданной размерной точности и качества поверхностного слоя при обработке лопаток ГТД приходится реализовывать множество проходов, что снижает производительность глубинного шлифования.

Для повышения производительности и эффективности глубинного шлифования при заданных параметрах качества необходимо прогнозирование качества деталей при обработке лопаток газотурбинных авиадвигателей, выявление взаимосвязи эксплуатационных показателей качества лопаток с параметрами поверхностного слоя и технологическими показателями процесса глубинного шлифования на основе математических моделей [1].

Процесс прогноза можно представить в виде трех этапов.

На первом этапе требуется установить зависимость колебаний сил и температур в зоне резания, шероховатости поверхности от технологических режимов и характеристики круга.

$$\begin{aligned}\theta &= f(v, s, t, K^0, a_3 \dots), \\ P &= f(v, s, t, K^0, a_3 \dots), \\ R_a &= f(v, s, t, K^0, a_3 \dots)\end{aligned}\tag{1}$$

Далее необходимо выявить влияние температур в зоне резания и нагрузок на наклеп и остаточные напряжения в обрабатываемом материале [2, 3].

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ост}} &= f(\theta, P, R_a), \\ N &= f(\theta, P, R_a), \\ h_{\text{н}} &= f(\theta, P, R_a), \\ u_{\text{н}} &= f(\theta, P, R_a)\end{aligned}\tag{2}$$

Затем следует определить влияние параметров поверхностного слоя на предел выносливости σ_{-1} лопаток.

$$\sigma_{-1} = f(\sigma_{\text{ост}}, T, R_a) \quad (3)$$

Такие математические зависимости, связывающие предел выносливости σ_{-1} с шероховатостью, наклепом и остаточными напряжениями были получены Т.В. Серенсенем, В.П. Когаевым, Р.Б. Шнейдеровичем [2].

Значительное внимание на первом этапе должно быть уделено исследованию динамики и устойчивости процесса, термодинамическим явлениям при профильном глубинном шлифовании [3,4]. Качество поверхностного слоя заготовки определяется одновременным воздействием геометрического, силового и теплового факторов, являющихся функциями процесса шлифования и имеющих непосредственную связь с относительными колебаниями формообразующих узлов станка [4].

Колебания при шлифовании являются вынужденными, но их уровень зависит от степени устойчивости динамической системы. Колебания динамической системы станка при шлифовании вызывает изменение фактического срезаемого слоя, фактической силы резания, а в силу взаимосвязанности процессов вызывают изменения в тепловой системе станка при шлифовании. Это приводит к колебаниям температур в зоне шлифования.

Задача заключается в поиске путей снижения колебаний шлифовальных станков за счет повышения степени устойчивости системы. Это позволит управлять тепловыми и упругими явлениями при шлифовании так, чтобы обеспечить заданное качество поверхностного слоя лопатки и предел выносливости. Поэтому при исследовании определяют способы исключения колебаний или понижения их уровня. В рамках решения задачи были проведены теоретические исследования влияния конструктивных параметров и режимов резания на устойчивость и уровень температур при глубинном шлифовании.

До настоящего времени, тепловые и динамические процессы при шлифовальной обработке исследовались отдельно. Но при использовании предельных режимов шлифования и повышении требований к точности обработки постоянные времени этих процессов в зоне резания становятся сравнимыми. Поэтому динамическое поведение технологического оборудования можно предсказать только с учетом комплексного воздействия тепловых и упругих процессов.

Для исследований в данной работе использована математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка [5], учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания. Для построения математической модели использован метод электрической аналогии, который позволяет отразить как тепловые, механические, так и процессы другой физической природы. В модели упругая система 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. В качестве сосредоточенных масс выделены: станина и основание станка; стол; колонна со шлифовальной бабкой; гильза шлифовального шпинделя; шлифовальный круг. Шпиндель шлифовального круга представлен как стержень, закрепленный в гильзе шпинделя и испытывающий изгибные деформации.

Шлифование, как процесс пластического деформирования и разрушения материалов детали и круга, занимает промежуточное положение между резанием резцом [3,4] (инструментом с определенной режущей кромкой) и трением. Поэтому при

моделировании динамики процесса при шлифовании необходимо учесть особенности этого процесса.

Математические модели должны учитывать, что изменения условий обработки (режимы резания, геометрия и характеристика круга, и др.) влияют на силы резания через изменение фактического, а не номинального сечения срезаемого слоя.

Используя метод прямой аналогии и сделанные допущения, получаем следующую структурную схему, которая отражает динамику тепловых процессов при шлифовании (рис. 1). Представленная математическая модель описывает основные теплодинамические процессы при шлифовании. Она обладает достаточной гибкостью и универсальностью, позволяет отображать нюансы тепловых и механических упругих процессов при различных условиях обработки.

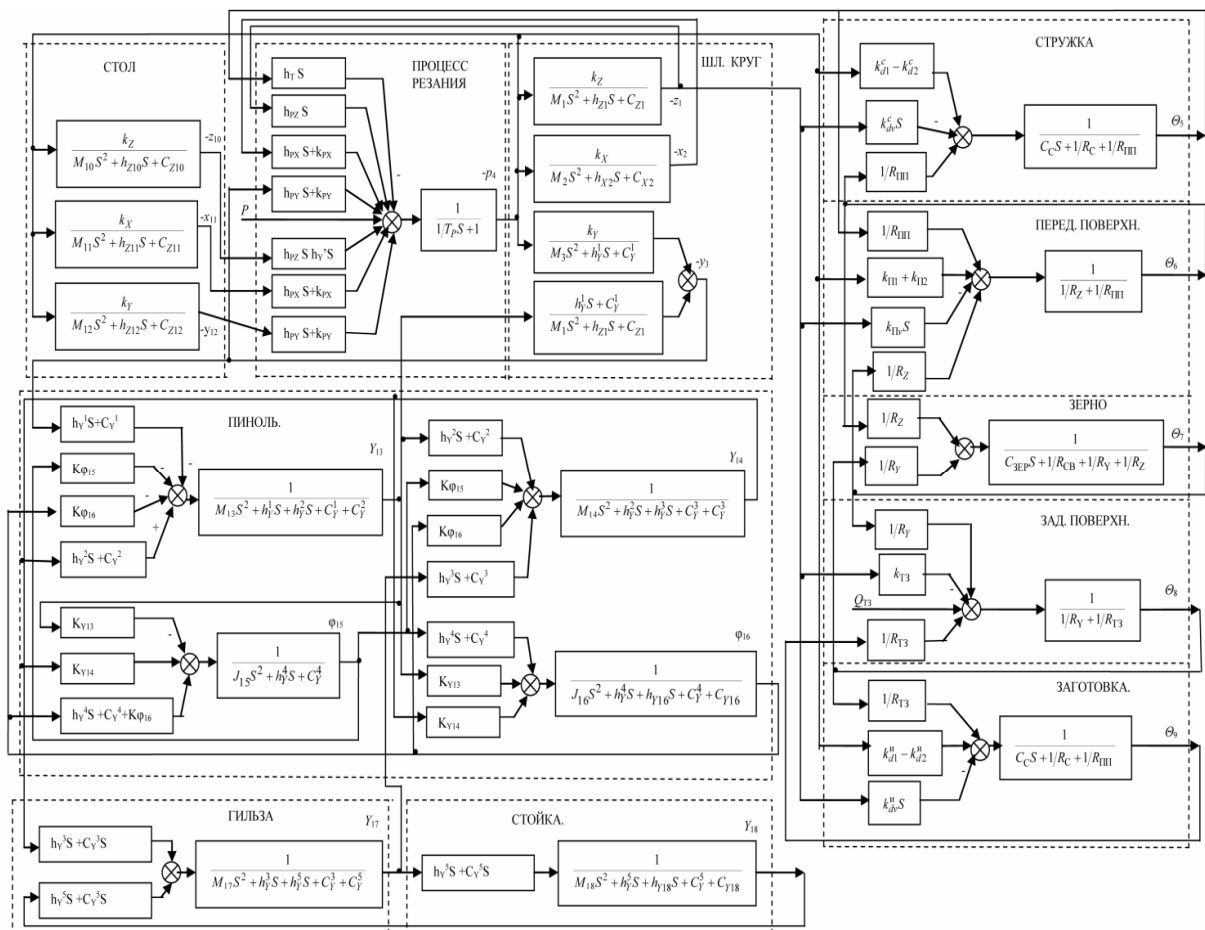


Рис. 1. Структурная схема теплодинамической системы шлифовального станка при учете резания в виде обобщенной линейной модели: C_z, C_y, C_x, C_ϕ – приведенные жесткости соответствующих подсистем; h_z, h_y, h_x – приведенные коэффициенты демпфирования механических подсистем; $R_c, R_{пш}, R_z, R_y, R_{св}, R_{тз}, R_{пш}$ – коэффициенты сопротивления тепловому потоку в зоне шлифования; M_z, M_y, M_x, J_ϕ – приведенные инерционные параметры подсистем; L – условная податливость процесса резания единичной величины; T_p – постоянная времени стружкообразования; P – номинальная сила резания, определяемая припуском; $Q_{тз}$ – источник тепла от трения по задней поверхности зерен.

Использование для анализа полученной математической модели позволило получить основные зависимости и характеристики взаимодействия упругой и тепловой систем при врезном шлифовании, в частности получить амплитудно-частотную характеристику для температуры резания при периодическом изменении силы резания. Амплитудно-частотные характеристики показывают, что внешние воздействия на собственных частотах вызывают резонансное увеличение колебаний температуры резания. При низкой устойчивости динамической системы станка при шлифовании амплитуда колебаний может значительно возрасти и приводить к периодическим дефектам поверхности в виде прижогов, изменения физико-механических свойств шлифованной поверхности, а также снижению предела выносливости лопатки. Эти же явления могут происходить при врезании шлифовального круга в заготовку, когда возникают переходные процессы в динамической системе.

Устойчивость системы при глубинном шлифовании определяется замкнутостью системы, которая включает в себя упругую систему шлифовального станка, процесс шлифования и тепловые процессы в зоне резания. Она может быть исследована с помощью критерия Найквиста [2,3].

Динамическая характеристика резания вызывает фазовое смещение, что выражается в повороте амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы (годографа), что может приводить к пересечению отрицательной ветви вещественной оси. Таким образом, система станка при резании становится потенциально неустойчивой.

При шлифовании изменение условий обработки (продольной и поперечной подачи, ширины круга, зернистости и т.п.) влияет на силы резания, а значит и на устойчивость, через изменение фактического сечения срезаемого слоя. Этим объясняется влияние на устойчивость системы продольной и поперечной подач. С возрастанием поперечной подачи фазовое смещение годографа разомкнутой системы увеличивается, а значит, устойчивость системы в замкнутом состоянии уменьшается. Продольная подача при шлифовании оказывает также значительное влияние на устойчивость. Устойчивость технологической системы при глубинном шлифовании снижается также с увеличением глубины фрезерования. Изменение скорости резания практически не оказывает влияния на устойчивость замкнутой системы станка при глубинном шлифовании.

На устойчивость при последующих проходах влияют также вибрационные следы предыдущей обработки. Это явление иногда называют регенеративным эффектом. Наличие следов создает в динамической системе станка при резании дополнительную обратную связь с запаздыванием.

Обратные связи с запаздыванием вызывают дополнительное фазовое смещение, что может приводить к пересечению отрицательной ветви вещественной оси. Исследование показывает, что величина запаздывания воздействия от следов предыдущей обработки оказывает сильное воздействие на устойчивость при шлифовании.

Наиболее эффективным способом стабилизации системы, повышения устойчивости, является изменение передаточной характеристики процесса шлифования. Этого можно достигнуть изменением технических характеристик круга (зернистости, твердости и т.д.). Однако при этом требуется проверка результатов изменений с помощью моделирования.

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.

Общие выводы

1. Качество поверхностного слоя определяется динамикой и устойчивостью процесса шлифования, термодинамическими явлениями при профильном глубинном шлифовании.
2. При глубинном шлифовании за счет регенеративного эффекта со стороны шлифовального круга и режимов резания может значительно снижаться устойчивость системы станка. Это вызывает повышенные колебания в системе, которые влияют на точность и тепловые процессы
3. Для обеспечения качества обработки лопаток и повышения эффективности глубинного шлифования целесообразно внедрить методику, включающую прогноз устойчивости динамической системы шлифовального станка на основе математического моделирования и корректировку режимов резания и технических характеристик круга.

Список литературы: 1. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие.- СПб.: Издательство “Лань”, 2013. – 320 с. 2. Безъязычный В.Ф. Определение технологических условий обработки, обеспечивающих заданную величину предела выносливости материала исследуемых образцов. – ООО «Издательский дом «СПЕКТР», «Справочник. Инженерный журнал», 2014.- с. 3-8. 3. Полетаев В. А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. - М.: Машиностроение, 2009. - 272 с. 4. Никитин С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием./ Вестник УГАТУ. Уфа, Россия, 2013. Т. 17, №8(61), стр. 38-44. 5. Никитин С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем. // Уфа, Вестник УГАТУ, 2009, Т.12, №4(33), с. 61-65.