

УДК 621.92

В.Ф.Макаров, д-р техн. наук, проф., С.П. Никитин, канд. техн. наук
Пермский научный исследовательский политехнический университет, Россия
Тел./Факс: 8 (342) 219-82-95; E-mail: makarovv@pstu.ru

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Представлены результаты теоретического исследования устойчивости при глубинном шлифовании лопаток турбины газотурбинных двигателей. Для исследования использована теплодинамическая модель плоскошлифовального станка. Рассмотрено влияние параметров динамической системы станка и процесса шлифования на устойчивость и предел выносливости лопаток турбины газотурбинных двигателей.
Ключевые слова: технология обработки, глубинное шлифование, динамическая система станка, устойчивость динамической системы, термодинамика процесса резания, динамические характеристики

Жаропрочные литейные никелевые сплавы используют для изготовления рабочих и сопловых лопаток турбины газотурбинных двигателей (ГТД) (рис.1). Известно, что наиболее эффективным технологическим процессом обработки базовых поверхностей лопаток турбин являются процесс глубинного шлифования. Этот процесс позволяет обеспечить высокую точность профиля $\pm 0,05\text{мм}$ и низкую шероховатость $Ra \leq 1,25\text{ мкм}$. При этом особенностью глубинного шлифования является увеличенная длина дуги контакта шлифовального круга с деталью, что приводит к возрастанию мощности и сил резания, общей тепловой напряженности в зоне резания. Что отрицательно влияет на качество и усталостную прочность лопаток.



Рис.1. Общий вид лопаток газотурбинных двигателей

Для прогнозирования качества деталей при обработке лопаток ГТД необходимо выявить взаимосвязи эксплуатационных показателей качества лопаток с параметрами поверхностного слоя и технологическими показателями процесса глубинного шлифо-

вания [1]. Значительное внимание должно быть уделено исследованию динамики и устойчивости процесса, термодинамическим явлениям при профильном глубинном шлифовании [2,3].

Качество поверхностного слоя заготовки определяется одновременным воздействием геометрического, силового и теплового факторов, являющихся функциями режимов процесса шлифования и характеристик кругов, которые имеют непосредственную связь с относительными колебаниями формообразующих узлов станка. Общая теория колебаний при резании дает ответ на вопрос о характере колебаний при шлифовании. Колебания при шлифовании являются вынужденными, но их уровень зависит от степени устойчивости динамической системы.

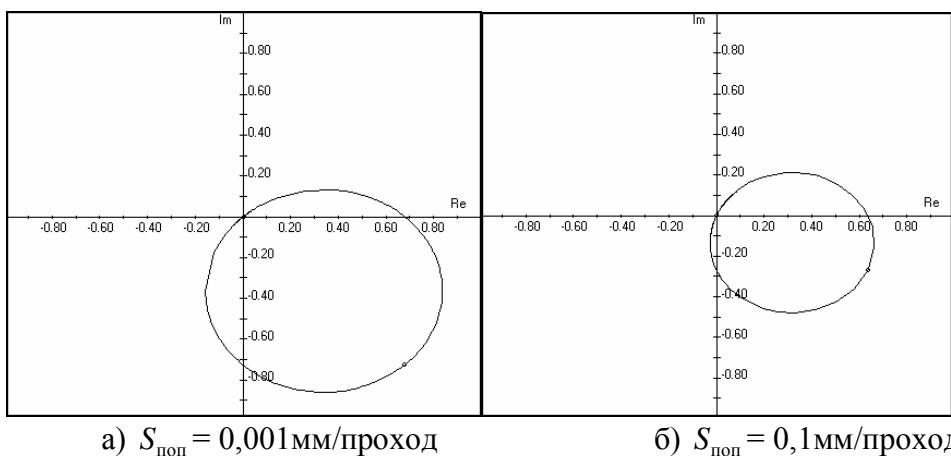
Задачей является поиск путей снижения колебаний шлифовальных станков за счет повышения степени устойчивости системы. Это позволит управлять тепловыми и упругими явлениями при шлифовании так, чтобы обеспечить заданное качество поверхностного слоя лопатки и предел выносливости. Поэтому при исследовании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

Ставится задача поиска путей снижения колебаний шлифовальных станков за счет повышения степени устойчивости системы. Это позволит управлять тепловыми и упругими явлениями при шлифовании так, чтобы обеспечить заданную точность и качество поверхностного слоя заготовки.

Для исследований в данной работе использована математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка [4], учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания. Для построения математической модели использован метод электрической аналогии [5], который позволяет отразить как тепловые, механические, так и процессы другой физической природы. Привод главного движения, привод подачи и несущая система представлены в модели упрощенно, в виде эквивалентных жесткостей.

Влияние режимов резания, свойств обрабатываемого материала и геометрии шлифовального круга на динамические характеристики процесса шлифования могут быть получены на основе использования динамической характеристики резания. Процесс резания оказывает влияние на устойчивость системы. Она может быть исследована при анализе замкнутой динамической системы станка при шлифовании с помощью критерия Найквиста [2,3]. Динамическая характеристика резания вызывает фазовое смещение, что выражается в повороте амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы (годографа), это 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.

Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутой системы станка при шлифовании с различными поперечными подачами показаны на рис.2. Из рисунка видно, что с возрастанием поперечной подачи фазовое смещение годографа разомкнутой системы увеличивается, а значит, устойчивость системы в замкнутом состоянии уменьшается.



а) $S_{\text{pop}} = 0,001 \text{мм/проход}$

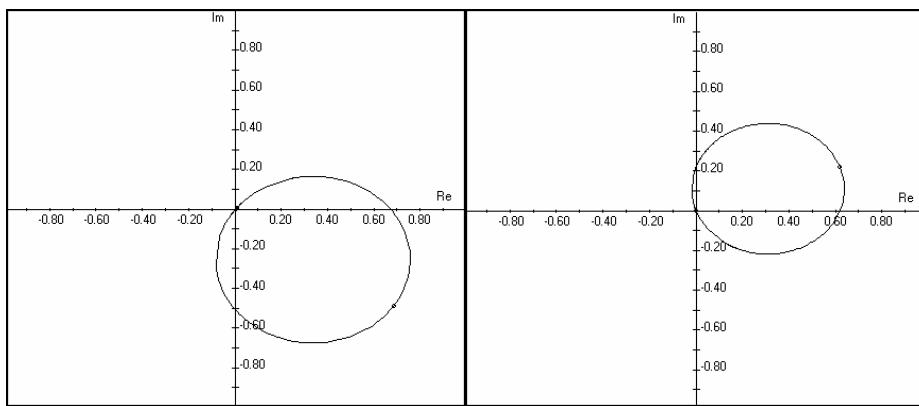
б) $S_{\text{pop}} = 0,1 \text{мм/проход}$

Рис. 2. АФЧХ разомкнutoй системи станка при шлифуванні з роз-
личними поперечними подачами S_{pop}

Ізмінення швидкості різання практично не оказує вплив на устойчивость замкнutoй системи станка при шлифуванні.

Продольна подача при шлифуванні оказує значительне вплив на устой-
чивость (рис.3).

Вплив вибровібраційних слідів на устойчивость при наступних проходах такоже відомо давно [3]. Це явлення іноді називають регенеративним ефектом.



а) $S_{\text{pr}} = 1,5 \text{ м/мин}$

б) $S_{\text{pr}} = 3,5 \text{ м/мин}$

Рис. 3. АФЧХ разомкнutoй системи станка при шлифуванні з роз-
личними про-
дольними подачами S_{pr}

Наличие слідів створює в динамічній системі станка при різанні додо-
вільну обратну зв'язь. Обратні зв'язки з запаздюванням викликають додо-
вільне фазове смещение, що виражається в дальнішому повороті амплітудно-фазової ха-
рактеристики разомкнutoй системи, що може приводити до пересеченню отрицательної
ветви вещественної осі.

На рис. 4 показані амплітудно-фазові характеристики замкнutoй системи станка при шлифуванні з урахуванням регенеративного ефекту. Для цього в математич-
ескій моделі в рівняння процесу різання вводиться дододвільний елемент, отра-
жаючий запаздювання сигналу від слідів попередньої обробки.

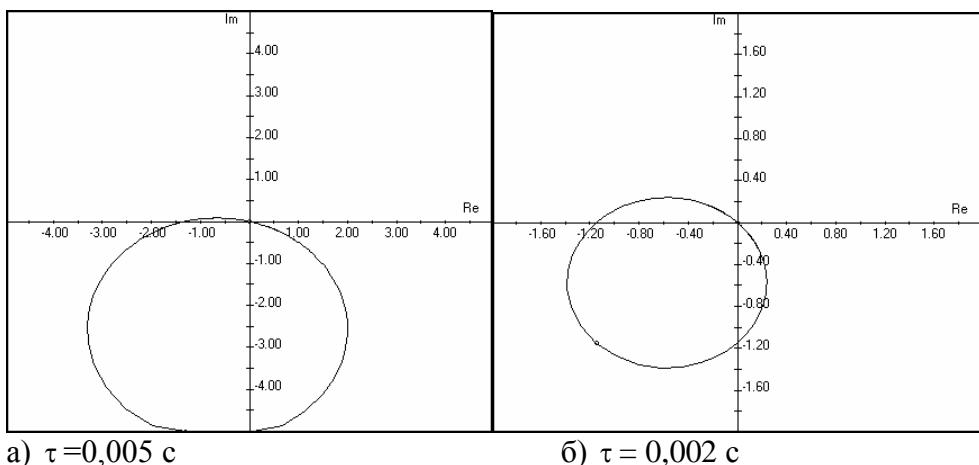


Рис. 4. АЧХ разомкнutoй системи станка при шлифуванні с различними запаздываниями τ

Из рисунка 3 видно, что величина запаздывания воздействия от следов предыдущей обработки оказывает сильное воздействие на амплитудно-фазовую характеристику станка при шлифовании.

При наличии неустойчивости динамическая система станка при шлифовании будет испытывать вынужденные колебания, в том числе на собственных частотах. Уровень этих колебаний будет определяться степенью неустойчивости, которая может понижаться до нуля. При выявлении нестабильности нужно исходить из того, что при шлифовании носителем регенеративного эффекта может быть микроволнистость шлифовального круга. Природа микроволнистости шлифовального круга определяется неравномерностью износа его участков, колебаниями при непрерывной правке, а также из-за зерен с различной способностью на периферии круга.

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.

На рис. 5 приведена амплитудно-частотная характеристика для температуры резания при периодическом изменении силы резания.

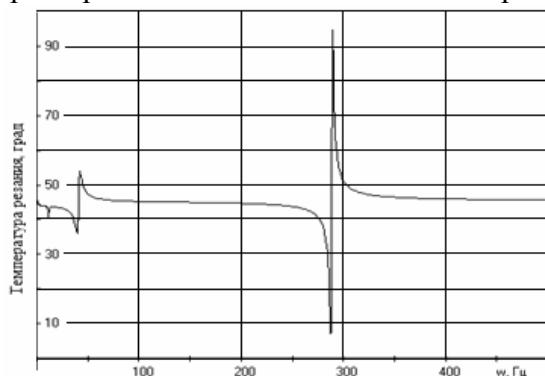


Рис.5. Колебания температуры резания при периодическом изменении силы резания

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 возрастать и приводить к периодическим дефектам поверхности в виде прижогов, изменения физико-механических свойств шлифованной поверхности.

Эти же явления могут происходить при врезании шлифовального круга в заготовку, когда возникают переходные процессы в динамической системе (рис.6).

Колебания температур при глубинном шлифовании лопаток ГТД ведут к тепловым расширениям металла в поверхностном слое и структурно-фазовым превращениям металла. Это определяет характер формирования и распределения остаточных напряжений 1-го рода в поверхностном слое.

Под руководством проф. Макарова В.Ф. были проведены работы по интенсификации процесса глубинного шлифования лопаток турбин на различных станках с ЧПУ на ОАО «ПМЗ» [1], которые подтверждают существенное влияние остаточных напряжений в тонком поверхностном слое замков лопаток на предел выносливости σ_{-1} и усталостную прочность.

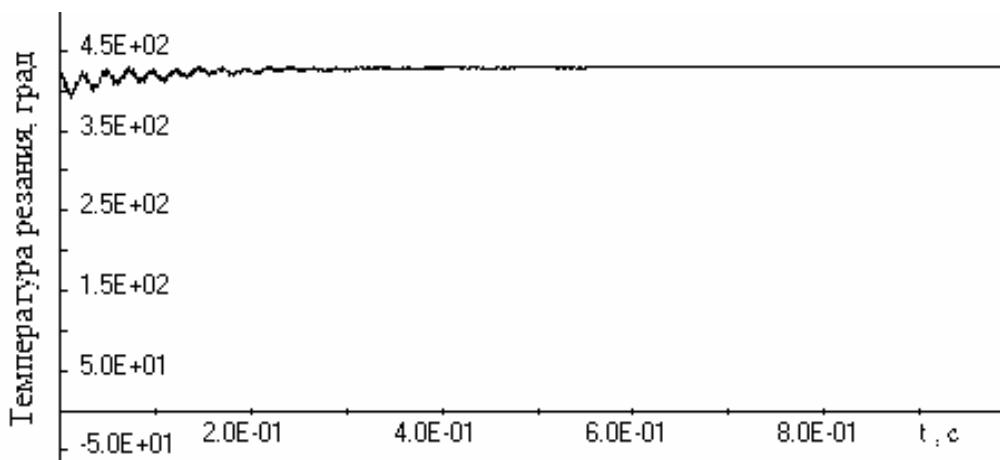


Рис.6. Переходный процесс колебаний температуры резания при ступенчатом приложении силы резания

Оптимизация станка связана с большими издержками. Поэтому, если на практике проявляется неустойчивость из-за регенеративного эффекта, то более эффективным способом стабилизации системы является изменение передаточной характеристики процесса шлифования. Этого можно достигнуть изменением режимов резания и технических характеристик круга. Однако при этом требуется проверка устойчивости 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.

Заключение

1. Предел выносливости σ_1 лопаток зависит от параметров качества поверхностного слоя, которые определяются динамикой и устойчивостью процесса шлифования, термодинамическими явлениями при профильном глубинном шлифовании.
2. Снижение устойчивости процесса глубинного шлифования может значительно повышать колебания в системе, которые влияют на точность и тепловые процессы, что в значительной степени определяет качество поверхностного слоя лопатки и предел выносливости.
3. Для обеспечения качества обработки в условиях опытного и мелкосерийного производства необходим прогноз на основе математического моделирования теплодинамической системы процесса глубинного шлифования, который позволит правильно выбрать режимы резания и другие параметры обработки.

Список литературы:

1. Макаров В.Ф. Современные методы высокоеффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие. - СПб.: Издательство “Лань”, 2013. – 320 с.
2. Полетаев В. А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технologа. - М.: Машиностроение, 2009. - 272 с.
3. Никитин С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием. // Вестник УГАТУ. Уфа, Россия, 2013. Т. 17, №8(61), стр. 38-44.
4. 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.
5. Никитин С.П. Моделирование технологического оборудования: Учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2001.- 139 с.

Надійшла до редколегії 10.12.2014.

Makarov V.F., Nikitin S.P.

IMPACT OF DEEP GRINDING MODES ON REFRactory ALLOY MATERIALS ENDURANCE LIMIT AND PROCESS STABILITY

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.
Key words: tooling method, deep grinding, machine dynamic system, dynamic system stability, cutting process thermodynamics, dynamic performance

Макаров. В.Ф., Никитин С.П.

ВПЛИВ ГЛИБОКОГО ПОДРІБНЕННЯ НА СТІЙКОСТЬ ПРОЦЕСУ І ВТОМІ МЕЖА ТЕПЛА ЖАРОМІЦНІ СПЛАВИ

Результати теоретичних досліджень стійкості під глибокий шліфувальні турбінних лопаток газотурбінних двигунів. Для дослідження використані динамічної моделі шліфування машини. Динамічні параметри машини і шліфування вплив на стабільність і обмеження витривалість турбінних лопаток газотурбінних двигунів.

Ключеві слова: Технологія обробки, глибоко шліфувальні машини, динамічної системи, стійкості динамічних систем, термодинаміки, динамічних характеристик розкрою процес