

УДК. 621.923

**Гусев В.В., Калафатова Л.П., Каракуц И.С., Поколенко Д.В.**

ДонНТУ, г. Донецк, Украина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ СПИД ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ИЗ СИТАЛЛОВ**

*In work dynamic properties of technological system are analyzed at grinding large-sized details from brittle nonmetallic materials. Instability of process of processing is connected with affinity of own frequencies of a subsystem "spindle unit of the machine - the adaptation – workpiece" to sources of excitation from a rotating grinding wheel.*

### ***Введение***

С развитием науки и техники перед современным машиностроением ставится ряд многообразных задач, одна из которых - надежное обеспечение технических характеристик изделий типа конструкций, работающих в широком диапазоне температур, при сложном сочетании переменных силовых и тепловых воздействий, в агрессивных рабочих средах. Часто условия эксплуатации изделий таковы, что для их изготовления невозможно или нерационально использовать металлы. В таких случаях задача решается за счет разработки и внедрения неметаллических материалов. К этим материалам, прежде всего, относятся различные виды технической керамики, включая стеклокристаллическую керамику – ситаллы. Ситаллы обладают комплексом требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик, среди которых следует отметить высокую твердость, высокую сопротивляемость сжатию при низкой удельной плотности, термостойкость, устойчивость к силовой напряженности и внешнему гидростатическому давлению. Эти свойства делают хрупкие неметаллические конструкционные материалы наиболее пригодными для применения в условиях агрессивных сред океана и космоса, в самолето- и ракетостроении. Специфика эксплуатации таких изделий предопределяет повышенные требования к точности изготовления и прочностным характеристикам, которые для материалов рассматриваемого класса в значительной степени определяются шероховатостью обработанной поверхности и сведением к минимуму дефектов поверхностного слоя.

Для решения этой проблемы предпринимаются многочисленные шаги: разрабатываются рациональные схемы шлифования [1], изучается влияние эффективности способа правки инструмента на дефектность шлифуемой поверхности изделий из ситаллов [2], анализируется влияние режимов шлифования [1] и физико-механических свойств материала [3] на составляющие силы резания. Но всего этого оказывается недостаточно для

получения требуемых точности и качества обработки крупногабаритных деталей типа оболочек. Это связано с тем, что при разработке технологических процессов (ТП) обработки таких изделий не учитывается динамика процесса шлифования из-за практического отсутствия сведений о влиянии этого фактора на точность и качество обработки изделий аналогичного класса. Для изучения этого процесса необходимо иметь точные данные о состоянии элементов системы СПИД и их влиянии на виброустойчивость системы при обработке конкретных изделий. Поэтому **целью** настоящей работы является определение динамических характеристик основных источников возникновения вибраций при алмазном шлифовании крупногабаритных изделий из ситаллов.

### ***Основная часть***

Технологический процесс обработки изделий включает многооперационную обработку шлифованием как наружного, так и внутреннего их контуров на станках типа РТ 66202, оснащенных агрегатной шлифовальной головкой и системой прямого копирования. В статье приведены результаты исследований динамических характеристик системы СПИД при шлифовании наружной поверхности детали, схема которой представлена на рис. 1.

Рисунок 1 – Схема наружной обработки изделия

Особенности обработки изделий рассматриваемого класса из ситаллов в значительной степени обусловлены следующими факторами. Основные размеры изделия: длина до 1,0 м; максимальный диаметр 450...500 мм; толщина стенки заготовки 20 мм при толщине готового изделия 5 мм. На обработку внутреннего контура изделия затрачивается примерно 18-20 часов машинного времени; обработка наружного контура занимает 6-10 часов при значительной доле ручного труда, применяемого на операции чистовой обработки наружного профиля. Эксплуатационные характеристики изделий предполагают соблюдение повышенных

требований по точности и качеству обработки, в частности, обеспечение минимальной глубины дефектности поверхностного слоя, которая определяет продолжительность последующих операций химического травления и упрочнения механически обработанных поверхностей [4].

На операции наружного шлифования обработка ведется в консольно закрепленном приспособлении, имеющем большой вылет (см. рис. 1). В этом случае система СПИД состоит из двух отдельных подсистем: «приспособление – заготовка» и «шпиндель – агрегатная головка – суппорт», которые связаны между собой зоной контакта при резании. Подсистема «шпиндельный узел станка – приспособление – заготовка» характеризуется переменной по длине заготовки жесткостью (от 1,6 Н/мкм у вершины изделия до 50 Н/мкм в цилиндрической части). Жесткость подсистемы «шпиндель – агрегатная головка – суппорт» составляет 4 Н/мкм. Низкая и переменная по длине заготовки жесткость первой подсистемы приводит к динамической неустойчивости процесса резания, наличию вибраций, интенсивность которых меняется в зависимости от места контакта заготовки с инструментом, схемы обработки. Динамическая неустойчивость системы резания отрицательно влияет на точность и качество обработки.

На данном этапе исследований расчетным путем определены динамические характеристики следующих элементов технологической системы: коробки скоростей станка; шпиндельного узла станка с приспособлением; обрабатываемой заготовки с приспособлением.

Для определения причин возникновения автоколебаний были определены динамические характеристики коробки скоростей станка, которые определялись расчетным путем для частоты вращения шпинделя  $n_d = 80 \text{ об/мин}$  – наиболее часто употребляемый при обработке уровень частоты вращения шпинделя. Методика расчета предполагает поэтапное преобразование элементов реальной коробки скоростей в расчетную схему, которая представлена на рис. 2. Здесь  $I_1$  и  $I_3$  – соответственно, эквивалентные моменты инерции ротора двигателя и моменты инерции деталей коробки скоростей и приспособления;  $e_3$  – крутильная эквивалентная податливость элементов коробки скоростей.

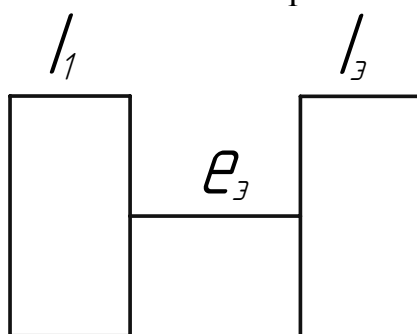


Рисунок 2 – Расчетная схема динамической системы привода вращения заготовки

Эквивалентный момент инерции коробки скоростей рассчитывается по формуле:

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i',$$

где  $I_i'$  – момент инерции элементов коробки скоростей: зубчатых колес, валов, шкивов ременной передачи, приспособления.

Крутильная эквивалентная податливость может быть найдена из зависимости [5]

$$e_{\Sigma} = \frac{1}{I_{\Sigma}} \cdot (e_i' \cdot I_i' + (e_i' + \dots + e_n') \cdot I_n'),$$

где  $e_i'$  – податливость элементов коробки скоростей: электродвигателя, валов, ременной передачи, шпоночных и шлицевых соединений и т.д.

В результаты расчетов находятся значения собственных частот крутильных колебаний привода коробки скоростей шпинделя станка. Для определения верхней собственной частоты используется формула

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{I_{\Sigma} + I_1'}{e_{\Sigma} \cdot I_1' \cdot I_{\Sigma}}}.$$

Расчеты показывают, что  $\omega_{02} = 7.84 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, собственное значение крутильной частоты  $f_{pac} = \frac{\omega_{02}}{2 \cdot \pi} = 1.247 \text{ Гц}$ .

Полученную нижнюю собственную частоту крутильных колебаний системы сопоставляем с частотой возмущения (т.е. с частотой вращения заготовки).

Для принятых условий частота возмущения определится из зависимости

$$f_{\omega 03} = \frac{n_{\partial}}{60} \cdot k_{\phi},$$

где  $n_{\partial}$  – частота вращения детали (заготовки),  $n_{\partial} = 80 \text{ об/мин}$ ,  $k_{\phi}$  – коэффициент формы заготовки.

Для реальных условий (материал заготовки – технический ситалл, характеристик формы, профиля, размеров заготовки, в сочетании с условиями технологии ее изготовления) сечение заготовки близко к эллипсу. В этом случае можно принять, что  $k_{\phi} = 2$ . Тогда частота возмущающих колебаний будет равна  $f_{\omega 03} = 2.6 \text{ Гц}$ .

Система считается устойчивой [5], если  $f_{\omega 03}$  находится в диапазонах:

$$0,7 \cdot f_{pac} > f_{\omega 03}; \text{ или } f_{\omega 03} > 1,3 \cdot f_{pac}.$$

В нашем случае выполняется условие  $f_{воз} > 1,3 \cdot f_{рас}$ , то есть  $2,6 > 1,625$ . Таким образом, можно считать, что в подсистеме «двигатель – коробка скоростей – деталь» не возникают крутильные колебания.

Рассмотрим возможность возникновения изгибных колебаний в упругой системе СПИД, расчетная схема которой показана на рис.3.

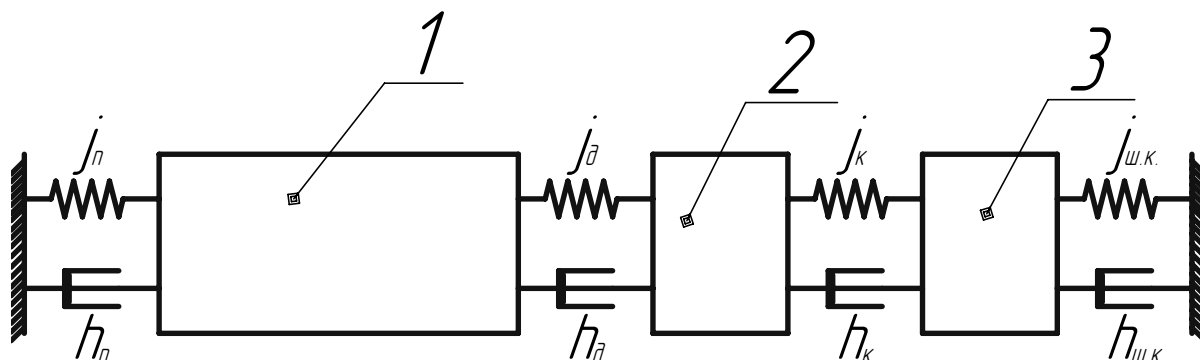


Рисунок 3 – Динамическая модель шлифования,  
где 1 – шпиндельный узел с приспособлением; 2 – заготовка;  
3 – агрегатная головка со шлифовальным кругом

Шпиндельный узел станка служит для крепления и вращения приспособления с заготовкой, обеспечивая заданное положение их по отношению к другим элементам станка в процессе обработки. Конструктивная форма шпиндельного узла определяется типом и назначением станка, условиями работы шпинделя, способом крепления заготовки, типом подшипников.

Расчет динамических характеристик шпинделя станка производится при помощи специальной программы, реализованной в пакете Mach CAD 2001. При расчете используется метод начальных параметров в соответствии с методикой, описанной в работе [6]. Расчетная схема шпиндельного узла представлена на рис. 4. Расчет динамических характеристик шпинделя осуществляется с учетом приспособления, необходимого для установки детали.

Разработанная программа позволяет построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) шпинделя с учетом возбуждающих воздействий со стороны процесса резания и привода. АЧХ шпиндельного узла с учетом массы приспособления и заготовки при воздействии переменной силы резания показана на рис. 5. Амплитуда колебаний измеряется в метрах, а круговая частота – в рад/с.

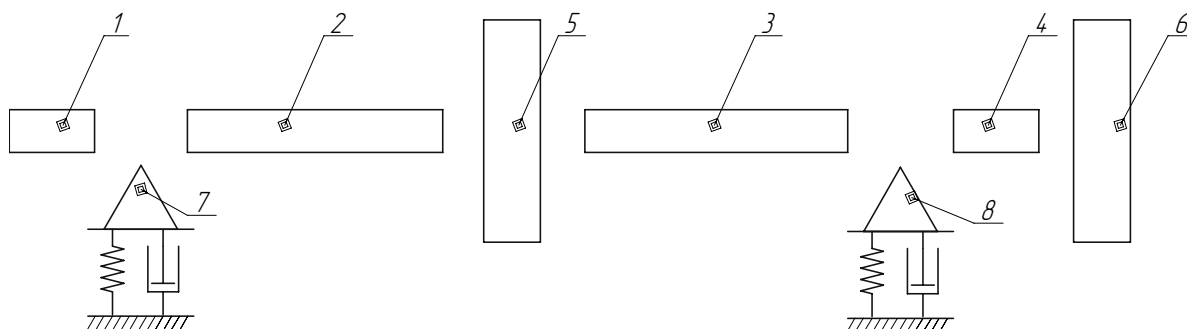


Рисунок 4 – Расчетная схема шпиндельного узла с приспособлением, где 1, 2, 3, 4 –участки шпиндельного узла; 5 – зубчатое колесо, через которое передается вращение на шпиндель; 6 – приспособление; 7, 8 – подшипниковые опоры

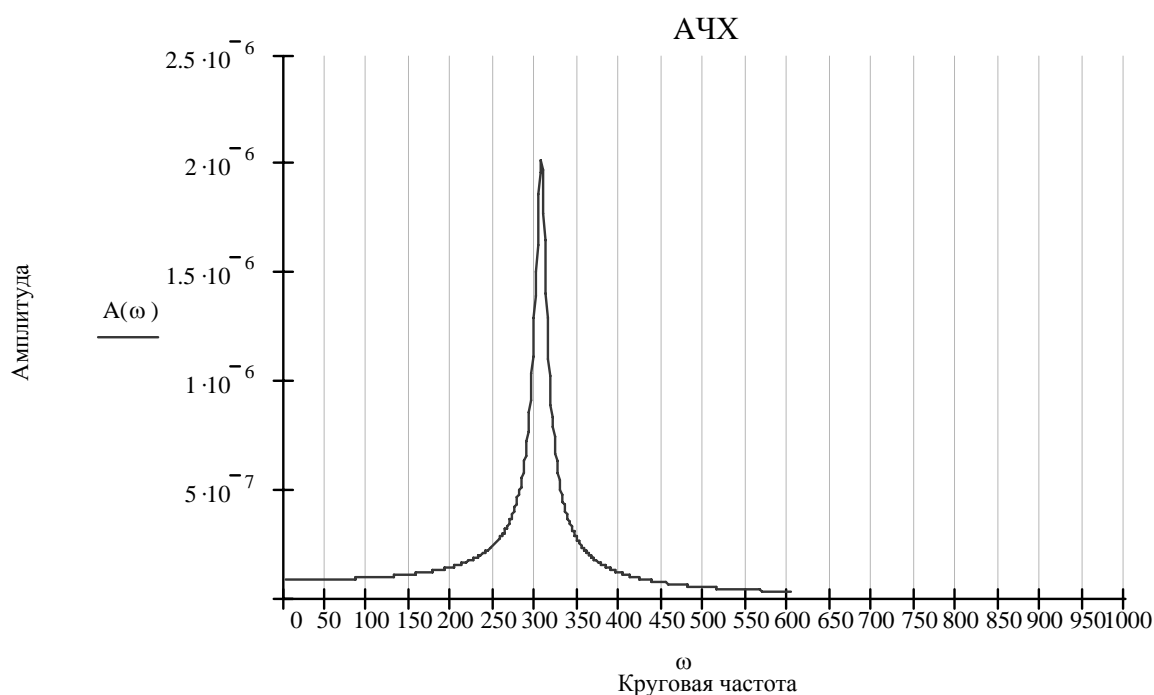


Рисунок 5 – АЧХ шпиндельного узла под воздействием силы резания

Из приведенного графика видно, что нижняя частота собственных изгибных колебаний подсистемы «шпиндельный узел – приспособление – заготовка»  $f_{с.ш.}$  равняется  $314 \text{ рад/с}$  или 50 Гц.

Была проведена экспериментальная проверка собственных частот подсистем «шпиндельный узел – приспособление – заготовка» и «шлифовальная головка – суппорт». Собственные частоты колебаний элементов системы СПИД определяли по записи свободных колебаний системы после импульсного возбуждения. Для преобразования механических перемещений в электрические использовали виброметр ВР-2, а запись свободных колебаний производили на осциллографе С7-8.

Экспериментальные значения собственных частот колебаний подсистемы «шпиндельный узел – приспособление – заготовка» составили

соответственно 55 Гц и 123 Гц. Расхождение между расчетом и экспериментальными данными нижней собственной частоты составило 10 %. Нижняя собственная частота шпиндельного узла агрегатной шлифовальной головки 710 Гц.

Частота вращения шпинделя шлифовального круга (ШК) 2900 об/мин, что обеспечивает скорость резания 30 м/с. При установке ШК с биением, которое в производственных условиях достигает 0,06 мм, при обработке возникает источник возбуждения с частотой 48 Гц. На кругломере мод. 290 были получены круглограммы поверхности ШК. На поверхности круга образуются в процессе обработки три волны. В этом случае при шлифовании возникает источник возбуждения с частотой 144 Гц. Это свидетельствует о близости частот возбуждения со стороны ШК с собственными частотами подсистемы «шпиндельный узел – приспособление – заготовка».

Амплитуду автоколебаний и их частоту, возникающую при шлифовании, определяли по слепкам с поверхности заготовки. В зоне контакта заготовки со шлифовальным кругом имели место колебания на двух частотах  $60 \pm 5$  Гц и  $123 \pm 10$  Гц, близких к собственным частотам подсистемы «шпиндельный узел – приспособление – заготовка». Остается до настоящего времени не ясным влияние на возникновение автоколебаний в системе СПИД переменной жесткости заготовки, которая является тонкостенной оболочкой вращения (см. рис.3).

Возможными путями повышения виброустойчивости системы обработки заготовок из ситалла являются: повышение демпфирования зоны контакта за счет ее увеличения при применении более рациональных схем шлифования, применения пассивных и активных демпферов.

### ***Выводы***

Таким образом, были проанализированы следующие элементы системы СПИД: коробка скоростей модернизированного станка, шпиндель станка с приспособлением, шлифовальный круг. Результаты расчета и экспериментов показывают следующее. В системе «коробка скоростей – шпиндельный узел – приспособление» не возникают крутильные колебания. При шлифовании шпиндельный узел станка с приспособлением и заготовкой испытывает вибрации, что отрицательно скажется на качестве поверхности детали. Это, прежде всего, связано с нагрузками, действующими со стороны шлифовального круга агрегатной головки. Виброустойчивость системы СПИД вносит значимый вклад в формирование требуемых свойств детали, в частности, на образование дефектного слоя, оказывающего влияние на прочностные характеристики изделия из хрупких неметаллических материалов. Таким образом, анализ элементов системы СПИД дает информацию для проектирования эффективных и рациональных технологических процессов обработки керамики и ситаллов обеспечения качества обработанной поверхности за счет правильного выбора входных параметров технологического процесса.

Дальнейшие исследования в области вибрационных свойств системы СПИД заключаются в анализе детали с приспособлением под действием переменной распределенной нагрузки, установленной экспериментальным путем. Моделирование будет выполняться в двух программных пакетах: Solid Works и ANSYS.

### Литература

- 1 Гусев В.В., Калафатова Л.П. Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий из конструкционной керамики на стадии их производства // Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей / За заг. ред. А.І. Грабченка. – Том 2. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – С. 334-346.
- 2 Гусев В.В., Калафатова Л.П. Вплив стану робочої поверхні алмазного інструмента на процес шліфування крихких неметалевих матеріалів // Вісник Житомирського державного технічного університету.–№2 (26).– 2003.– С.49-54.
- 3 Гусев В.В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2003.- Вип. №13. – С. 70-76
- 4 Калафатова Л.П. Прогнозирование качества поверхностного слоя при обработке изделий из технических ситаллов // Приложение №9 к журналу «Инженерный журнал. Справочник » Инженерия поверхности. – М.: Машиностроение. – 2002. – №9. – С.5-8.
- 5 Расчеты на прочность деталей машин: Справочник / Сост.: И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702с.
- 6 Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов/Под ред. В.Є. Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.