

С.В. Антонычев<sup>1</sup>✉, соискатель

E-mail: [25111976@list.ru](mailto:25111976@list.ru) ✉

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени  
М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия

## **Повышение качества изготовления крупногабаритных изделий со смещенным центром тяжести, на токарном станке с ЧПУ на основе анализа параметров вибрации и динамической балансировки**

**Аннотация.** Проведена динамическая балансировка изделия со смещенным центром тяжести на первоначальной стадии черновой обработки, определены слабые в плане «вибрационной» нагруженности места системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД), поставлены новые задачи научно-исследовательской работы.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, балансировка изделий со смещенным центром тяжести

### **Введение**

В настоящее время изготовление крупногабаритных изделий со смещенным центром тяжести на токарных станках с ЧПУ затруднено по ряду причин [1, 2]:

1. Увеличение числа оборотов шпинделя станка приводит к повышенным вибрациям и сокращает ресурс узлов станка.
2. Динамическая балансировка изделия в специальном приспособлении не даёт должного результата, так в процессе обработки изделия срезается большая масса металла, которая приводит к разбалансировке.
3. Овальность обточенной детали получается при биении шпинделя вследствие разбалансировки.

Из литературы по технологии обработки деталей со смещенным центром тяжести, на токарном станке известно лишь одно изобретение “Металлорежущий станок для обработки заготовок со смещенным центром тяжести” [2].

Данное устройство для динамической балансировки выполнено в виде охватывающей шпиндель в плоскости, перпендикулярной оси его вращения и жестко соединенной с ним, кольцевой емкости, в полости которой размещены легкоплавкий тяжелый сплав и электронагревательные кольцевые элементы.

Станок работает следующим образом.

Заготовку со смещенным центром тяжести закрепляют в зажимных элементах и приводят шпиндель во вращение до закритической частоты, превышающей частоту его свободных круговых колебаний, и одновременно нагревая тяжелый сплав электронагревательными элементами до текучего состояния.

При этом в полости кольцевой емкости происходит динамическое перераспределение массы тяжелого сплава, выравнивающее общую степень несбалансированности системы. Затем, поддерживая постоянные обороты шпинделя, отключают нагревательные элементы от источника питания и по достижении затвердевания тяжелого сплава, фиксирующего сбалансированное состояние системы, снижают обороты шпинделя до рабочих и производят обработку заготовки.

Данный способ балансировки совершенно не подходит при изготовлении цапфы лапы бурового долота (диаметр 660,4 мм), поскольку установлено, при 520 об./мин уже выходит из строя подшипник качения центра задней (упорной) бабки станка, тем самым добиться закритической частоты, превышающей частоту его свободных круговых колебаний не представляется возможным.

Данное исследование положило свое начало в июле 2022 года после обращения в адрес ООО «Энергопромсервис», г.Москва крупнейшего разработчика и производителя инструментов для бурения о возможности оказания услуг по получению набора балансировочных грузов и мест установки на токарном приспособлении, позволяющем в дальнейшем выполнять токарную черновую и чистовую обработку цапфы лапы бурового долота (диаметр 660,4 мм), на многоцелевом токарном станке с ЧПУ модели PUMA 480 L (рис.1), с заданными параметрами шероховатости поверхности (таблица 1).

*Таблица 1.* Планируемые режимы обработки деталей и параметры шероховатости поверхностей после динамической балансировки деталей в специальном приспособлении

| Операция                                                          | Число оборотов шпинделя – п, об./мин | Подача резца на один оборот детали – S, мм/об. | Шероховатость, мкм |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| черновая обработка цапфы лапы бурового долота (диаметр 660,4 мм), | 500                                  | 0,20-0,35                                      | Ra 3,20            |
| чистовая обработка цапфы лапы бурового долота (диаметр 660,4 мм), | 500                                  | 0,10-0,20                                      | Ra 0,63            |

В настоящее время на токарную обработку детали уходит 6 часов. При этом черновая обработка проходит при оборотах шпинделя не выше 200 об./мин, а чистовая при оборотах не выше 250 об./мин. При возникновении значительных вибраций работу, как правило, приходится прекращать.



*Рис. 1. Цапфа лапы бурового долота (диаметр 660,4 мм) в специальном приспособлении*

Вибрация токарного станка, ее причины может быть разделена на следующие группы:

- собственные колебания узлов станка;
- колебания, возникающие от частоты вращения шпинделя;
- колебания, возникающие от дефектов опор качения шпинделя;
- колебания, возникающие в процессе резания заготовки.

В настоящей статье излагаются методы устранения колебаний, возникающих от частоты вращения шпинделя при разбалансировке.

Динамическая балансировка проведена в период с 5 по 7 октября 2022 г. специалистом II уровня по вибрационному анализу машин Антонычевым С., при помощи прибора «Агат-М», предназначенного для измерения

параметров вибрации и числа оборотов, а также для спектрального анализа вибрационных сигналов в целях диагностики технического состояния технологических машин, и проведения динамической балансировки вращающегося оборудования в собственных опорах (номер в ГРСИ РФ: 29452-05, в составе: блок измерительный БИ070-М; два вибропреобразователя АС-102-1А; фотоотметчик лазерный КР-020Л, импульсный молоток с наконечниками).

Прибор «Агат-М» соединили (кабелем) с компьютером, что позволило выполнить обработку полученных сигналов с использованием программного обеспечения «Диамант-2», системы прогнозируемого обслуживания механического оборудования, разработанного фирмой «Диамех 2000».

Укажем допустимые амплитуды колебания для основных станков:

- Токарные, сверлильные, строгальные станки 5-10 мкм,
- Фрезерные, расточные станки 3-7 мкм,
- Шлифовальные, прецизионно-расточные станки 1-3 мкм,
- Отделочные станки до 1 мкм,

Станки, имеющие амплитуду колебаний выше 20 мкм, следует считать неисправными или работающими с вибрациями недопустимой величины.

### **Результаты вибрационных испытаний детали со смещённым центром тяжести**

Испытания проведены на токарном станке PUMA 480 L в условиях реального резания и в реальном времени. В качестве заготовок использовали предварительно фрезерованные детали под черновую, получистовую и чистовую обработки. Число оборотов шпинделя токарного станка варьировалось  $n = 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400, 500$  и 550 об/мин.

Чтобы максимально точно провести испытания, поочередно на подшипниках передней и задней бабки станка были установлены два акселерометра АС-102-1А: один в вертикальной (точка А) другой в горизонтальной (точка Б) плоскости.

На рисунке 2 показаны точки измерения вибрации на подшипниковых опорах, в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях по параметру виброперемещения (мкм).



Рис. 2. Точки измерения вибрации.  
Вертикальная (точка А) / горизонтальная (точка В)

Принятые обозначения диагностических узлов:

- 1 – подшипник шпинделя передней бабки станка, со стороны ременной передачи
- 2 – подшипник шпинделя передней бабки станка, со стороны приспособления
- 3 – подшипник вращающегося центра задней (упорной) бабки станка

Экспресс-диагностика состояния подшипников шпинделя передней и задней бабки станка на холостом ходу не выявила никаких дефектов. Состояние подшипников качения оценено по форме сигнала виброускорения и пиковому значению виброускорения,  $\text{м/с}^2$ .

На каждом из обследуемых подшипниковых узлов, в поперечном направлении выполнялись измерения временного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ , максимальное значение амплитуды виброускорения в сигнале – ПИК) в полосе частот от 80 до 8000 Гц (продолжительность - 100 мс, длина выборки – 2048 точек) [3, 4].

Перед балансировкой анализ вибрации показал, что максимальная вибрация была зафиксирована на подшипнике вращающегося центра задней (упорной) бабки станка (в вертикальном направлении) при увеличении числа оборотов шпинделя. На рисунке 3 представлена зависимость вибрации в данной точке от оборотов шпинделя при «разгоне» до 400 об./мин. Видно, что вибрация, начинает расти, и выходит за норму в 10  $\mu\text{м}$  уже после 160 об./мин.

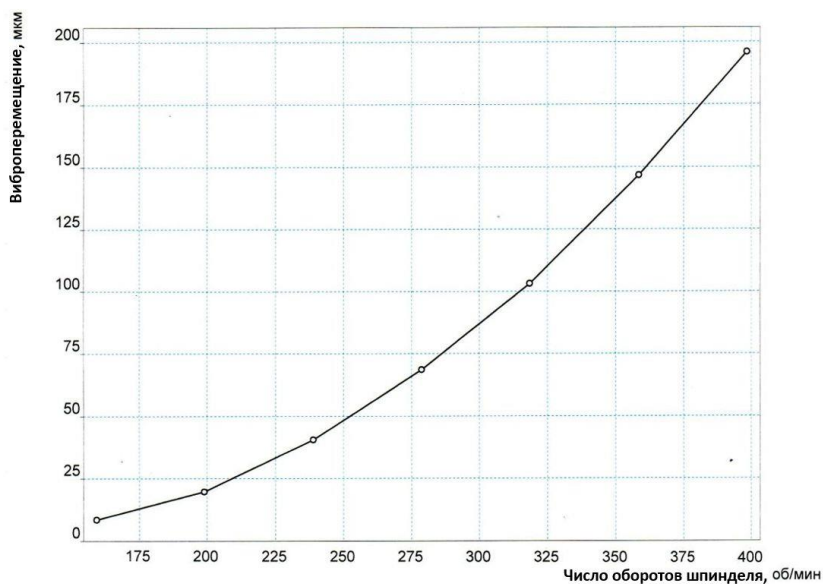


Рис. 3. Зависимость вибрации подшипника вращающегося центра задней (упорной) бабки станка, в вертикальном положении от оборотов

В ходе работ было установлено, что изменение усилия прижима детали задним вращающимся центром станка PUMA 480 L совершенно не влияет на радиальное биение последнего. Значения виброперемещения полученные при 400 об./мин с увеличением давления прижима представлены ниже:

15 бар = 205 мкм

25 бар = 208 мкм

38 бар = 201 мкм

К недостаткам вращающегося центра задней (упорной) бабки можно отнести радиальное биение, не позволяющее форсировать режимы резания. Если по техническим требованиям данная погрешность недопустима, практикуется финишная обработка с применением неподвижного центра на шадящих режимах.

### **Результаты динамической балансировки детали со смещённым центром тяжести**

Балансировка с установленной под черновую обработку деталью выполнена одноплоскостная, достаточно популярным и точным методом

фазной балансировки «векторных построений» [5, 6]. Число оборотов шпинделя токарного станка при этом составило 405 об/мин.

Масса токарного приспособления 210 кг, масса детали до обработки 144,3 кг. После обработки деталь весит 104,8 кг.

В результате балансировки при черновой обработке цапфы лапы бурового долота (диаметр 660,4 мм), на токарном станке PUMA 480 L на торце специального приспособления с градуированной шкалой было установлено 2 балансировочных груза одинаковой массы (316 грамм каждый). Один груз установлен на угол  $90^\circ$  второй в угле  $190^\circ$ .

Вектор вибрации частоты вращения (6,75 Гц) подшипника шпинделя передней бабки станка, со стороны приспособления (характеризующий величину дисбаланса) уменьшился с 21 мкм /  $35^\circ$  до 7 мкм /  $15^\circ$ . Наблюдение за параметрами вибрации (в точках 1,2) в процессе черновой обработки изделия показало, что со съёмом металла параметр виброперемещения постепенно отклоняется от нормы.

Получистовая и чистовая обработка изделия проходила без балансировочных грузов. Так как балансировочные расчеты показали, что балансир на специальном приспособлении был изготовлен с учетом массы изделия (под получистовую и чистовую обработки).



Рис. 4. Балансировочный груз, установленный на торце специального приспособления с градуированной шкалой

## Выводы

На сегодняшний день в России не существует технологии интенсификация режимов резания при изготовлении крупногабаритных деталей со смещенным центром тяжести. В связи с чем, новизна данной работы неоспорима, и заключается в изобретении принципиально нового технического решения (интеллектуальная система [7-10] противовесов), компенсирующего большую массу срезаемого с детали металла, обеспечивающего повышение качества обрабатываемой поверхности и увеличения ресурса металлорежущих станков, за счет снижения динамических нагрузок, вызываемых несбалансированными массами обрабатываемых заготовок со смещенным центром тяжести.

Сейчас во всем мире идет гонка по созданию умных систем, где искусственный интеллект пристально следит за всеми быстроизменяющимися процессами, отображает всевозможные данные, ведет архив, прогнозирует вероятность тех или иных отказов. Иными словами, искусственный интеллект невидимое делает видимым при этом поражая своим функционалом и быстродействием.

Подбор токарного центра для станка, имеющего минимальные радиальные биения при обработке крупногабаритных изделий, также является ключевым вопросом.

Кроме того, необходимо провести дополнительные исследование вибрации токарного станка на:

- собственные колебания узлов станка;
- колебания, возникающие от дефектов опор качения шпинделя;
- колебания, возникающие в процессе резания заготовки.

## Список источников

1. *Кедров С.С.* Колебания металлорежущих станков // – М: Машиностроение. 1978. –199 С.
2. Авторское свидетельство СССР №1321525 А1. МПК В23В 3/00. Металлорежущий станок для обработки заготовок со смещенным центром тяжести / Сафонов Г.Г., Егоров В.Ф., Назаров К.А., Дяченко В.С., Филиппов П.И. – Заявка 3892637 от 11.05.1985. – Оpubл. 07.07.1987. – Бюл. № 25.
3. *Антонычев С.В.* Приспособление для проверки технического состояния подшипников качения валковой сборки станков холодного пильгерования на основе экспертной системы «СВК-Ариадна» / М.В. Савин, А.А. Аляев, А.В. Дубовцев // Производство проката. – 2006. – № 1. – С. 41–45. – EDN [KTNITF](#).
4. *Крючков Ю.С.* Влияние зазора на вибрацию и шум подшипников качения // Вестник машиностроения. – 1959. – №8. – С.30– 39.
5. *Антонычев С.В.* Балансировка лопастей вентилятора градирни // Электрические станции. – 2019. – №12. – С.38–41. – EDN [BEHGSN](#).

6. Гусаров А.А. Колебания и уравнивание роторов // – Москва: Наука, 1973. – 140 с.
7. Костюков, В.Н. Мониторинг безопасности производства // – М: Машиностроение. 2002. – 204 С.
8. Неразрушающий контроль: справ. В 7 т. Т. 7. В 2 кн. Кн. 2. Виброакустическая диагностика / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др.; под общ. ред. В.В. Ключева. – М: Машиностроение, 2005. – 829 С.
9. Костюков В.Н. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР™ КОМПАКС®) / Бойченко С.Н., Костюков А.В. – М.: Машиностроение. 1999. –163 С.
10. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам. // Судостроение. – 1985. – № 3. – С.21– 23.

S. V. Antonychev<sup>1</sup> ✉, applicant  
E-mail: 25111976@list.ru ✉

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Improving the quality of manufacturing large-sized products with a displaced center of gravity, on a CNC lathe based on the analysis of vibration parameters and dynamic balancing**

**Abstract.** A dynamic balancing of a product with a displaced center of gravity at the initial stage of roughing was carried out, weak places in terms of "vibration" loading of the machine-tool-tool-part (SPID) system were identified, and new research tasks were set.

**Keywords:** vibrodiagnostics, balancing products with a displaced center of gravity