

## **Влияние тепловых деформаций на работоспособность шпинделя.**

**Название секции:** “Металлорежущие станки и оборудование”

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Металлорежущие станки» (МТ1) (студент)

Макеев Александр Алексеевич // эл. почта: [sasha.makeev.1104@mail.ru](mailto:sasha.makeev.1104@mail.ru)

**Ключевые слова.** Шпиндельный узел, мотор-шпиндель, погрешности обработки, тепловые деформации, источники тепла шпинделя, температурные нагрузки, инженерный анализ, статический расчет, точность механической обработки.

**Аннотация:** В работе исследовано влияние тепловых деформаций на точность позиционирования шпиндельных узлов металлорежущего оборудования. Методом компьютерного моделирования в среде COMSOL Multiphysics проведен анализ температурных полей и деформационных характеристик шпиндельного узла. Результаты показали, что наибольшие деформации наблюдаются в зоне переднего подшипника и инструментальной оправки. Предложены практические решения для минимизации температурных искажений.

### **Актуальность исследования**

В современном машиностроении к металлорежущему оборудованию предъявляются жесткие требования по точности обработки (до микронных допусков) и производительности. Однако практика показывает, что до 70% всех погрешностей обработки связано с тепловыми деформациями станка, причем шпиндельный узел является наиболее критичным элементом в этом отношении.

### **Природа тепловых деформаций в шпинделе**

Основными источниками тепловыделения в шпиндельном узле являются: подшипниковые узлы (тепловыделения за счет трения качения в подшипниках и вязкостного трения смазки), электродвигатель шпинделя (тепловыделения, вызванного потерями в обмотках статора и вихревыми токами в роторе), а также процесс резания, при котором выделяемое в зоне обработки тепло частично отводится стружкой и смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ)

### **Методика исследования**

#### **Математическое моделирование**

Для анализа использована многофакторная модель в COMSOL Multiphysics, включающая:

- Теплопередачу (кондукцию, конвекцию, излучение)
- Термоупругость материалов (коэффициент теплового расширения, теплопроводность, удельная теплоемкость)
- Контактные взаимодействия (упругие и пластические деформации, трение)

### **Граничные условия**

В качестве граничных условий при моделировании шпиндельного узла рассматриваются механические воздействия (радиальная и осевая силы резания, полное закрепление корпуса шпинделя - лишение 6-ти степеней свободы), а также

тепловые нагрузки (тепловыделение в подшипниковых узлах, тепловыделение статора, конвекция)

### **Ключевые результаты**

Максимальный нагрев зафиксирован в зоне передней подшипниковой опоры. Смещение инструмента в холодном состоянии составляет 7 мкм, а в нагретом - 50 мкм. Тепловое воздействие увеличивает деформации в 7 раз.

Полученные данные убедительно демонстрируют доминирующее влияние тепловых факторов на точность позиционирования. Погрешность позиционирования 50 мкм делает невозможной высокоточную обработку (IT5-IT6).

### **Практические рекомендации**

1. Конструктивное усовершенствование. Увеличение межопорного расстояния позволит уменьшить жесткостную чувствительность шпинделя. Увеличение точности посадочных мест позволит снизить контактные напряжения, снизить температурные деформации и увеличить срок службы.

2. Применение термостабильных материалов. Керамические шарики обладают меньшими коэффициентами теплового расширения и трения, чем стальные, что приводит к меньшим тепловым деформациям.

3. Спиральные канавки в корпусе шпинделя обеспечивают равномерное распределение охлаждающей жидкости. Эта технология позволяет снизить рабочую температуру подшипниковых опор и статора, что уменьшает смещение инструмента.

### **Заключение**

Проведенные исследования подтвердили решающее влияние тепловых деформаций на точность шпиндельных узлов. Разработанная модель позволяет:

1. Прогнозировать температурное поведение шпинделя
2. Оптимизировать конструктивные решения
3. Разрабатывать эффективные методы компенсации

### **Литература**

1. Ягопольский А.Г., Макеев А.А., Гюлалыев Э. Э. Возможность применения искусственного интеллекта при создании термостабильных компоновок технологического оборудования. // Научно-аналитический журнал “Инновации и инвестиции”. 2024. №2. – С. 261–263.

2. The thermal drift modeling of spindle system based on a physical driven deformation methodology. October 20th, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3417717/v1>

3. Ягопольский А. Г., Крикунов Д. Э. Анализ коррекции тепловых деформаций в станках // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. №5 (98). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-korreksii-teplovyyh-deformatsiy-v-stankah>

4. COMSOL [электронный ресурс]: Глобальный сервисный IT-дистрибутор URL: <https://axoft.ru/vendors/COMSOL/>