

# Машиностроение

УДК 621.9.08

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯГА ЕГО ОПОР**

**Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрена методика определения усилия предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла, работающего в режиме холостого хода. Разработан экспериментальный стенд для определения виброакустического параметра, характеризующего величину установленного усилия предварительного натяга. Экспериментальным путем были получены амплитудно-частотные характеристики откликов виброускорения шпиндельного узла при кратковременном воздействии силой непосредственно на его шпиндель. Выбран частотный диапазон сигнала виброускорения, на котором собственные колебания шпиндельного узла наиболее сильно реагируют на изменение усилия предварительного натяга, от 3200 до 4200 Гц. Проанализирован частотный состав амплитудных спектров сигнала виброускорения с целью определения пиков собственных частот шпиндельного узла при 5 различных значениях предварительного натяга. Получены зависимости абсциссы и ординаты центра тяжести спектрограммы мощности сигнала виброускорения с корпуса мотор-шпинделя в режиме холостого хода и при частоте вращения 60000 об/мин от усилия предварительного натяга.*

**Ключевые слова:** высокоскоростной шпиндель, подшипниковые опоры, датчик температуры, датчик виброускорения, предварительный натяг, амплитудно-частотная характеристика, режим холостого хода, пиковая частота, относительная мощность.

Актуальность и необходимость контроля усилия предварительного натяга опор качения шпиндельных узлов и роторных систем в целом, на стадии изготовления и сборки и на всем этапе эксплуатации приведена в работах многих авторов [1]. Величина установки предварительного натяга непосредственно влияет на быстроходность опоры качения и выбор технологического режима работы шпиндельного узла в целом. Однако большинство работ практической вибродиагностики посвящено обнаружению дефекта узла, а не обеспечению параметрической надежности, путем изменения упругих характеристик опор за счет регулирования усилия предварительного натяга.

---

*Эрик Сергеевич Гаспаров, ассистент кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы».*

*Александр Федорович Денисенко (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».*

*Лана Багратовна Гаспарова (к.п.н.), доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».*

Среди различных методов практической диагностики и контроля состояния подшипников качения по вибрации можно выделить три основных, различающихся по своей физической основе. Первый включает в себя контроль мощности вибрации подшипника, второй – анализ формы вибрации, возбуждаемой короткими ударными импульсами, а третий – спектральный анализ флуктуаций мощности вибрации [2]. В большей степени это касается высокочастотного диапазона вибрации как наиболее информативного в случае зарождающегося дефекта, но системы глубокой диагностики обязательно контролируют низкочастотный и среднечастотный диапазоны. Для разделения спектра сигнала на диапазоны используются частотные фильтры.

Существуют два различных подхода к выбору полосы частот диапазонного фильтра. Первый использует полосу частот, в которой возникает сильная резонансная вибрация с собственными частотами колебаний элементов подшипника. Второй подход заключается в использовании более высокочастотной нерезонансной вибрации [2, 3]. Оба подхода дают близкие результаты, но лишь в случае, когда в полосу частот фильтра не попадают гармонические составляющие вибрации, по мощности превышающие случайную вибрацию. В противном случае методы, в частности методы анализа формы, дают искаженную информацию о состоянии подшипника. На основе результатов определения собственной АЧХ узла, полученных ранее и рассмотренных в работе [4], в обработке экспериментальных данных при выборе частотной полосы фильтра в дальнейшем был использован первый подход.

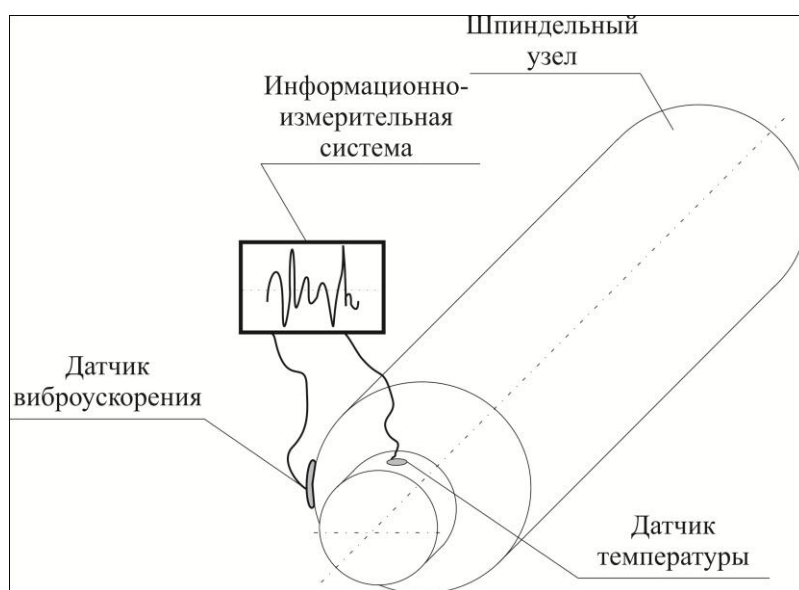


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Для апробации возможности использования результатов исследования и полученных критериев был проведен эксперимент, целью которого являлось определение зависимости данных диагностических параметров от величины предварительного натяга опор мотор-шпинделя, работающего в режиме холостого хода.

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. В качестве объекта исследования использовался тот же высокоскоростной шлифовальный мотор-шпиндель. Шпиндельный узел был жестко закреплен на массивном чу-

гунном столе. В его передней и задней опорах установлены одиночные радиально-упорные подшипники 76101E. В качестве источника напряжения питания мотор-шпинделя использовался преобразователь частоты фирмы Delta, который с высокой точностью обеспечил заданную частоту вращения шпинделя на всем интервале значений установки предварительного натяга.

Используемая информационно-измерительная система состоит из датчика виброускорения, датчика силы, датчика температуры (термопары), контроллера и программного обеспечения National Instruments. Датчик виброускорения был закреплен на корпусе (у передней опоры ротора). Температурный датчик измерял непосредственно температуру наружного кольца подшипника качения передней опоры. Для этого использовалось технологическое отверстие в крышке корпуса.

Для измерения и контроля силы предварительного натяга в конструкцию мотор-шпинделя были внесены изменения – установлен датчик силы между регулировочным винтом и пружиной предварительного натяга (рис. 2).

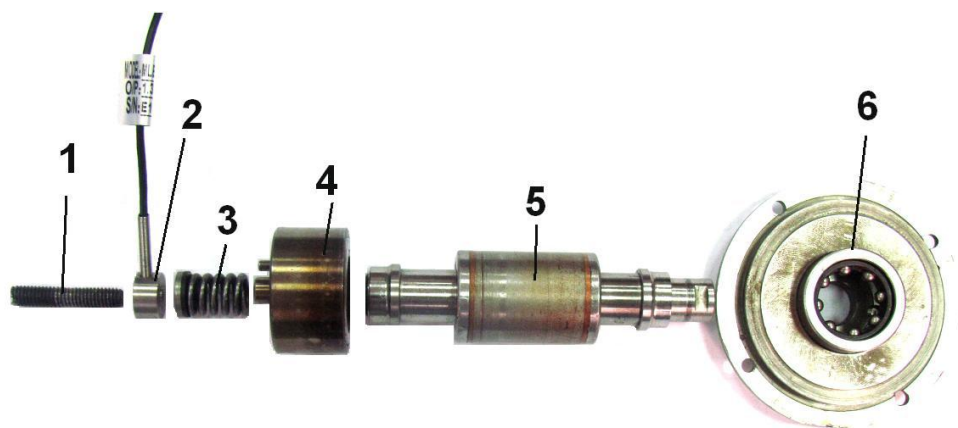


Рис. 2. Схема последовательного расположения элементов измененной конструкции мотор-шпинделя:

1 – регулировочный винт предварительного натяга; 2 – датчик силы; 3 – пружина предварительного натяга; 4 – задняя (плавающая) опора; 5 – шпиндель; 6 – передняя опора

Эксперимент проведен следующим образом: после 15 мин непрерывной работы на частоте вращения 60000 об/мин регулировочным винтом устанавливали значение усилия предварительного натяга и в течение пяти секунд записывали сигналы виброускорения с акселерометра, датчиков силы и температуры. Датчик температуры позволял контролировать и поддерживать температуру наружного кольца около 30–35 °С изменением расхода воды для охлаждения статора. Таким образом были получены временные реализации сигнала виброускорения для пяти значений усилия предварительного натяга.

Анализ амплитудно-частотных характеристик шпиндельного узла показывает (рис. 3, 4), что с увеличением значения предварительного натяга спектр начинает смещаться в область более высоких частот, а начиная со значения предварительного натяга, равного 80 Н, происходит заметное сужение «эффективной ширины» спектра [4].

Выберем частотный диапазон сигнала виброускорения, на котором собственные колебания шпиндельного узла наиболее сильно реагируют на изменение усилия предварительного натяга, от 3200 до 4200 Гц. При частоте вращения

60000 об/мин на данном частотном диапазоне находится 4-я гармоника частоты вращения ротора, мощность которой более чем на порядок выше относительно мощности остальных составляющих спектра выбранного диапазона, что делает неприменимыми выбранные критерии. В связи с этим для подавления данной гармоники был применен режекторный БИХ-фильтр для диапазона 3950–4050 Гц с ослаблением более 120 дБ на частоте 4000 Гц. На рис. 5 приведен спектр сигнала до (а) и после фильтрации (б).

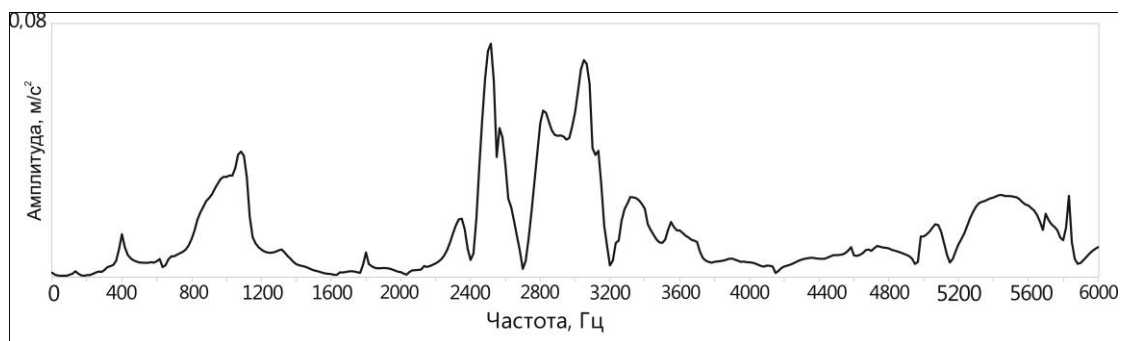


Рис. 3. АЧХ шпиндельного узла при усилии предварительного натяга 0,9 Н

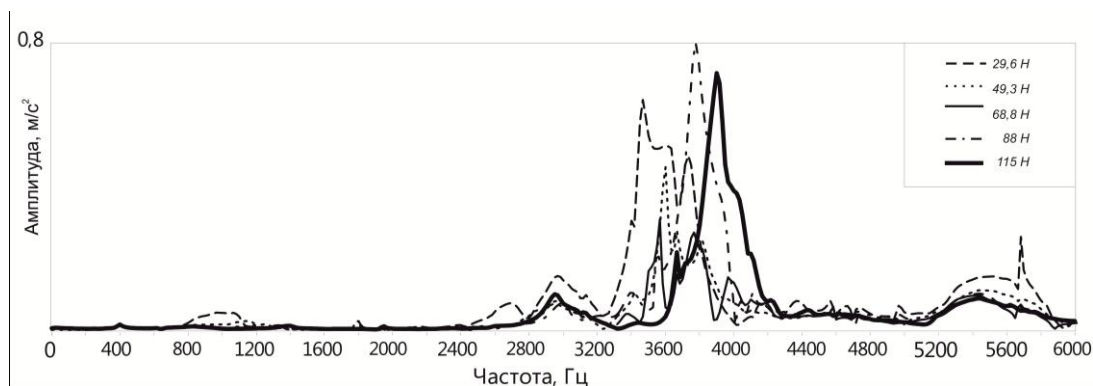


Рис. 4. АЧХ шпиндельного узла при различных значениях усилия предварительного натяга

В случае дискретного спектра формулы для расчета относительной пиковой частоты и мощности перепишем в виде формул (1) и (2), где  $\Delta f$  – расстояние между линиями спектра,  $a$  и  $b$  – нижняя и верхняя границы частотного диапазона в Гц соответственно:

$$f_c = \frac{\sum_{n=\frac{a}{\Delta f}}^{n=\frac{b}{\Delta f}} n \cdot S(n) \cdot \Delta f}{\sum_{n=\frac{a}{\Delta f}}^{n=\frac{b}{\Delta f}} S(n)} ; \quad (1)$$

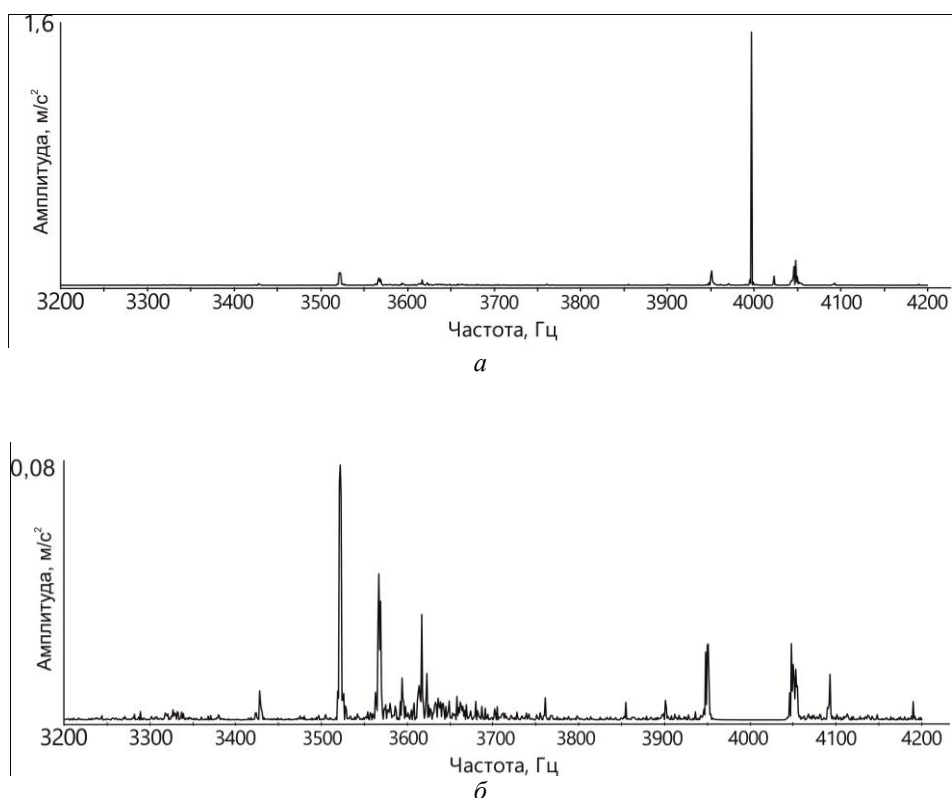


Рис. 5. График спектров сигнала:  
*a* – до фильтрации; *б* – после фильтрации

$$P_{\text{относит}} = \frac{\sum_{n=\frac{a}{\Delta f}}^{n=\frac{b}{\Delta f}} S(n) \cdot S(n)}{\sum_{n=\frac{a}{\Delta f}}^{n=\frac{b}{\Delta f}} S(n)} . \quad (2)$$

В результате эксперимента для пяти значений предварительного натяга были получены временные реализации сигналов виброускорений. Для двенадцати интервалов длительностью в одну секунду каждой реализации были вычислены относительные частота и мощность как абсцисса и ордината центра тяжести спектрограммы соответственно. Для каждого значения усилия предварительного натяга вычислены математические ожидания соответствующих значений относительных частоты и мощности. Полученные в результате обработки экспериментальных данных зависимости абсциссы и ординаты центра тяжести спектрограммы сигнала виброускорения с корпуса мотор-шпинделя в режиме холостого хода и при частоте вращения 60000 об/мин от усилия предварительного натяга приведены в таблице и на рис. 6 (*a*, *б*). Интерполяция точек проведена кубическим сплайном Эрмита.

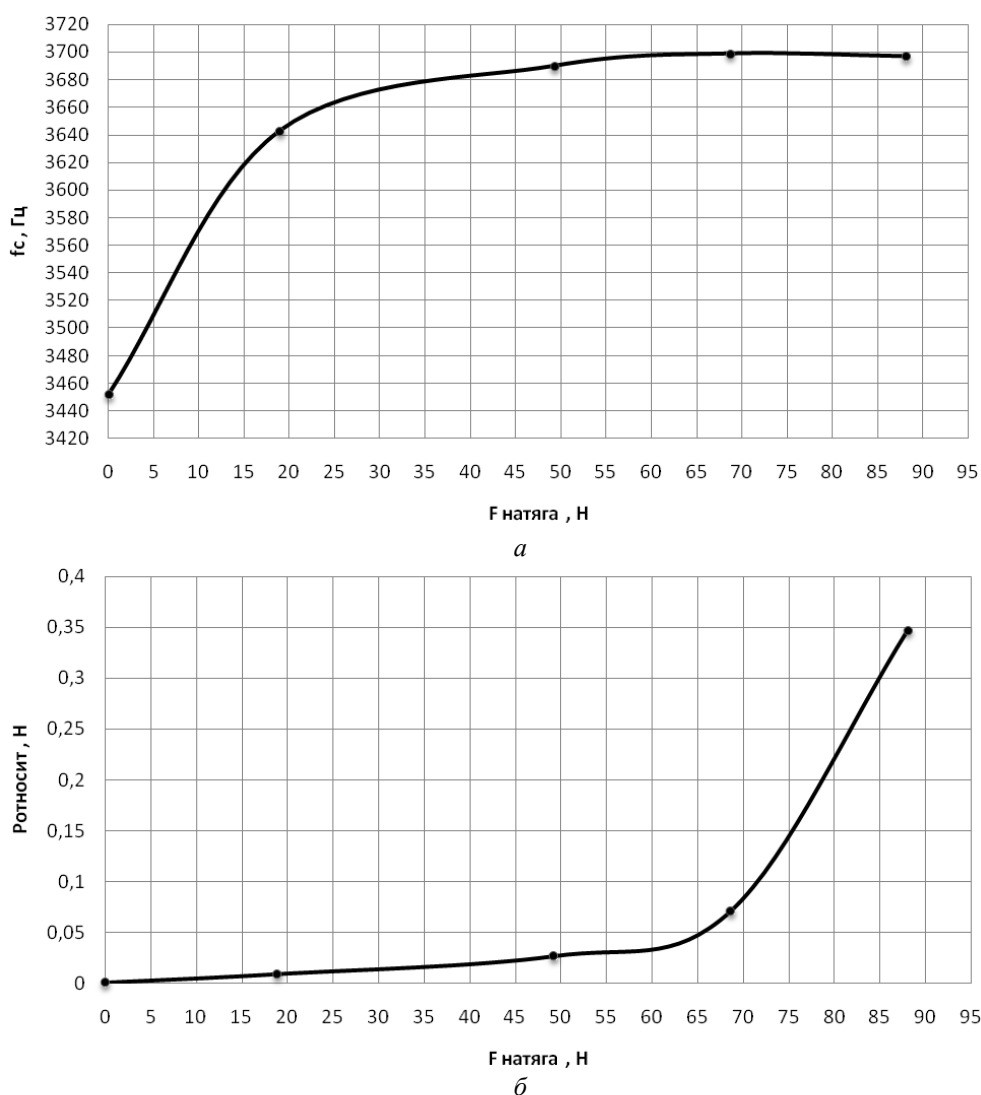


Рис. 6. Графики экспериментальных зависимостей:  
*a* – относительной пиковой частоты от усилия предварительного натяга;  
*б* – относительной мощности от усилия предварительного натяга

**Зависимости абсциссы и ординаты центра тяжести спектрограммы  
мощности сигнала виброускорения с корпуса мотор-шпинделя**

|                                 |          |         |         |        |         |
|---------------------------------|----------|---------|---------|--------|---------|
| $F_{\text{натяга}}, \text{ Н}$  | 0        | 18,9    | 49,2    | 68,6   | 88      |
| $f_c, \text{ Гц}$               | 3452     | 3643    | 3690    | 3699   | 3697    |
| $P_{\text{относит}}, \text{ Н}$ | 0,000909 | 0,00933 | 0,02695 | 0,0712 | 0,34712 |

Анализируя полученные результаты и исходя из того, что спектры вращающихся узлов содержат модулированные колебания с несущими в виде гармоник роторной частоты, а их боковые полосы содержат гармоники и субгармоники частоты вращения сепаратора, опираясь на известную формулу связи частоты сепаратора с роторной частотой, приходим к выводу, что растекание боковых

лепестков модулированных колебаний происходит как в сторону высоких частот, так и в область низких [1]. Именно с этим и с неравномерностью огибающей спектра собственных частот связана неоднозначность относительной пиковой частоты как критерия для определения величины усилия предварительного натяга. Для его улучшения необходимо применение гребенчатых фильтров и детальное изучение поведения вынужденных частот на фоне собственных частот колебаний узла для определения параметров диапазонного фильтра. Однако, как видно из рис. 6, а, для порогового критерия наличия предварительного натяга использование относительной частоты вполне возможно и при подавлении только роторной гармоник.

### Выводы

1. Относительная мощность, вычисляемая как ордината центра тяжести спектрограммы, с хорошей разрешающей способностью характеризует значение усилия предварительного натяга.

2. При соответствующей фильтрации сигнала вибрации относительная пиковая частота также может являться критерием для определения значения предварительного натяга.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения: Справ. – 6-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 574 с.
2. Barkov A.V., Barkova N.A., Mitchell J.S. Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings. – Part 1, Sound and Vibration, June, 1995, pp. 10–17.
3. Мартин Анжело. Мониторизация механических колебаний машинного оборудования. – Брюль и Кьер, Технический обзор № 1, 1987.
4. Гаспаров Э.С., Денисенко А.Ф., Гаспарова Л.Б. Методика определения усилия предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 94–98.

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.*

## EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF DEPENDENCE VIBRATIONAL AND DIAGNOSTIC PARAMETERS OF SPINDLE ON THE PRELOAD OF BEARINGS

**E.S. Gasparov, A.F. Denisenko, L.B. Gasparova**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The method of rating the forcing of bearing assembly spindle unit preload. A test-bench has been developed to quantify vibroacoustics, featuring the dimension of the identified preload forcing. Amplitude-frequency response characteristics of vibration acceleration of spindle unit during short-term forcing directly on the spindle became available by experiments. The frequency range of a signal of vibration acceleration was selected from 3200 Hz to 4200 Hz. The frequency content of amplitude spectra has been analyzed to determine eigen frequency peaks of spindle unit at various preload values.*

**Keywords:** high speed spindle, bearings, the temperature sensor, the acceleration sensor, preload force, amplitude-frequency characteristic, no-load conditions, peak frequency, relative power.

---

*Erik S. Gasparov, Assistant.*

*Alexander F. Denisenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

*Lana B. Gasparova (Ph.D. (Pedag.)), Associate Professor.*

УДК 621.74.046

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ ЛИТЬЯ НА ПРИМЕРЕ СТЕКЛОФОРМУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ

**И.О. Леушин<sup>1</sup>, Д.Г. Чистяков<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603650, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

<sup>2</sup>ОАО «Нормаль»  
603002, г. Нижний Новгород, ул. Литвинова, 74

*Рассмотрены материалы, применяемые для изготовления деталей стеклоформирующей оснастки. Представлена дифференцированная структура чугуна, позволяющая повысить эксплуатационную стойкость деталей стеклоформ. Описана технологическая цепочка изготовления данных деталей на производстве. Обозначены преимущества применения гетерогенной (по сечению заготовки) и дифференцированной по структурно-свободному цементиту и форме графита структуры для деталей машиностроения.*

**Ключевые слова:** дифференцированная структура, чугун, отливка, стеклоформа.

Подавляющее большинство деталей современных агрегатов работает в нестационарных термомеханических условиях, когда определенные части и узлы литых деталей подвергаются более интенсивному износу, чем основная их масса. Это может быть обусловлено как формированием фрикционных механизмов разрушения ответственных поверхностей, так и структурной трансформацией материала изделия за счет термомеханических нагрузок и протекающих в этих условиях превращениях. Все это способствует тому, что наиболее ответственная часть (узел) литой детали разрушается, а основная масса металлоконструкции остается невредимой или имеет незначительные повреждения. Однако обеспечить ремонт таких деталей современными средствами (газовая наплавка, поверхностная лазерная закалка и т. п.) не представляется возможным (ввиду появления микронесплошностей или изменения массы и размеров ответственных узлов), и такие детали отбраковываются в металлолом с дальнейшей их утилизацией (как правило, переплав в металлургических печах).

Решение данной проблемы становится очевидным при рассмотрении тела любой детали как композита со слоистой структурой, несущей в каждом отдельном слое свой комплекс технологических и функциональных свойств используемого материала. Например, детали стеклоформ испытывают высокие циклические тепловые (до 750...850 °С) и ударные механические (до 1,5...2,5 атм) нагрузки со стороны расплавленного стекла и компокуемых узлов на момент изготовления стеклянного изделия. При этом (в 99 % случаев) детали стеклоформ выходят из строя по причине нарушения сплошности материала на глубину не более 10 мм от рабочей поверхности, основная же масса формового комплекта

---

*Игорь Олегович Леушин (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование».*

*Дмитрий Геннадьевич Чистяков, аспирант.*

*Вячеслав Анатольевич Володин (д.т.н.), генеральный директор.*

остается невредимой и пригодной для дальнейшей эксплуатации. Подобным же образом (циклический нестационарный тепловой режим) эксплуатируются кокили, изложницы, пресс-формы для пластикового литья и т. д., то есть детали конструкций, в которых в «жестких» условиях эксплуатации находятся лишь ее отдельные узлы, блоки или части.

Сказанное выше подтверждает тот факт, что моносплавные (состоящие из сплава одной марки) конструкции таких деталей в современных условиях оказываются технически неудовлетворительными в эксплуатации, экономически невыгодными при бесперебойном (вплоть до капремонта) принципе работы оборудования и имеющими невысокий экологический приоритет (за счет постоянной переработки образующегося металлолома или его утилизации).

### Постановка задачи

Особый интерес для исследования представляют детали стеклоформ, изготавливаемые из чугунов с различной морфологией графита и применяемые для массового производства стеклянной тары. Общеизвестно, что самым распространенным материалом для деталей данного типа является серый чугун с пластинчатой формой графита (СЧПГ). Также внедрен ряд технологий, позволяющих получить «двухслойную» структуру литья [1]. А ввиду специальной технологии изготовления литых заготовок (принцип литья расплава чугуна в песчано-глинистую форму с предварительно помещенным в нее металлическим холодильником) и получения дифференцированных структур (типа «белый чугун (БЧ) – графитизированный чугун (ГЧ)», «чугун с шаровидной формой графита (ЧШГ) – чугун с вермикулярной формой графита (ЧВГ)») данный способ получил широкое распространение как у нас, так и за рубежом (рис. 1).



Рис. 1. Технология изготовления литых заготовок стеклоформ

Применение дифференцированной (слоистой) структуры деталей по аналогии с биметаллическими конструкциями (например, «сталь – чугун») при производстве труб центробежным способом позволяет разграничить функциональные возможности ответственных узлов стеклоформирующего оборудования (работающего в термоциклическом режиме с тактом 0,3...2,0 с) и частей деталей, отвечающих за отвод излишков тепловой энергии в окружающую среду цеха.

Ввиду этого важным аспектом технологии изготовления деталей стеклоформ является получение литой заготовки с микроструктурой, которая дает возможность достижения фазового и концентрационного равновесия еще в процессе изготовления, позволяющего эксплуатировать уже готовое изделие в условиях агрессивных сред и высоких температур без протекания трансформационных процессов в структуре чугуна [2].

### Исследование литых заготовок деталей

В настоящей работе исследовалось изменение структуры стеклоформы в различных слоях отливки и закономерности формирования отдельных фаз при различных технологиях изготовления заготовок стеклоформ (рис. 2).



Рис. 2. Литые заготовки стеклоформ с прибылями

Разнородность фазовых составов и распределения структурных составляющих в отдельных слоях отливки (рис. 3) связана, во-первых, с присутствием в технологическом процессе производства стеклоформ внешних металлических холодильников, формирующих рабочий отбеленный слой на внутренней поверхности заготовки, во-вторых, с применением сфероидирующих графитовую фазу модификаторов, и в-третьих, с заключительной термической обработкой заготовок, приводящей матрицу и элементы графитовой фазы чугуна к структуре, пригодной для работы в условиях термоциклического нагружения.

Присутствие первого звена в цикле изготовления стеклоформ оказывает качественное воздействие на первичную (литую) структуру изделия и определяет весь дальнейший комплекс его эксплуатационных свойств. При этом основными мотивами использования металлических холодильников в производстве стеклоформ являются:

- облегчение процесса формовки и изготовления заготовок;
- упрочнение рабочего слоя изделия;
- измельчение графитовой фазы чугуна;
- превращение части структурного графита в прочные сложнокомпонентные карбиды.

Использование второго звена в технологической цепи производства стеклоформ обеспечивает получение графитовой фазы чугуна необходимых размеров, форм и распределения.

Третье звено производственного цикла определяет конечную структуру готовой к эксплуатации стеклоформы. Первоопределяющими причинами применения данного этапа в технологической цепочке производства стеклоформ являются:

- снятие внутренних напряжений, образовавшихся в процессе затвердевания чугуна;
- гомогенизация металлической основы;
- измельчение включений карбидов и снижение их общего количества;
- повышение пластичности металлической основы чугуна.

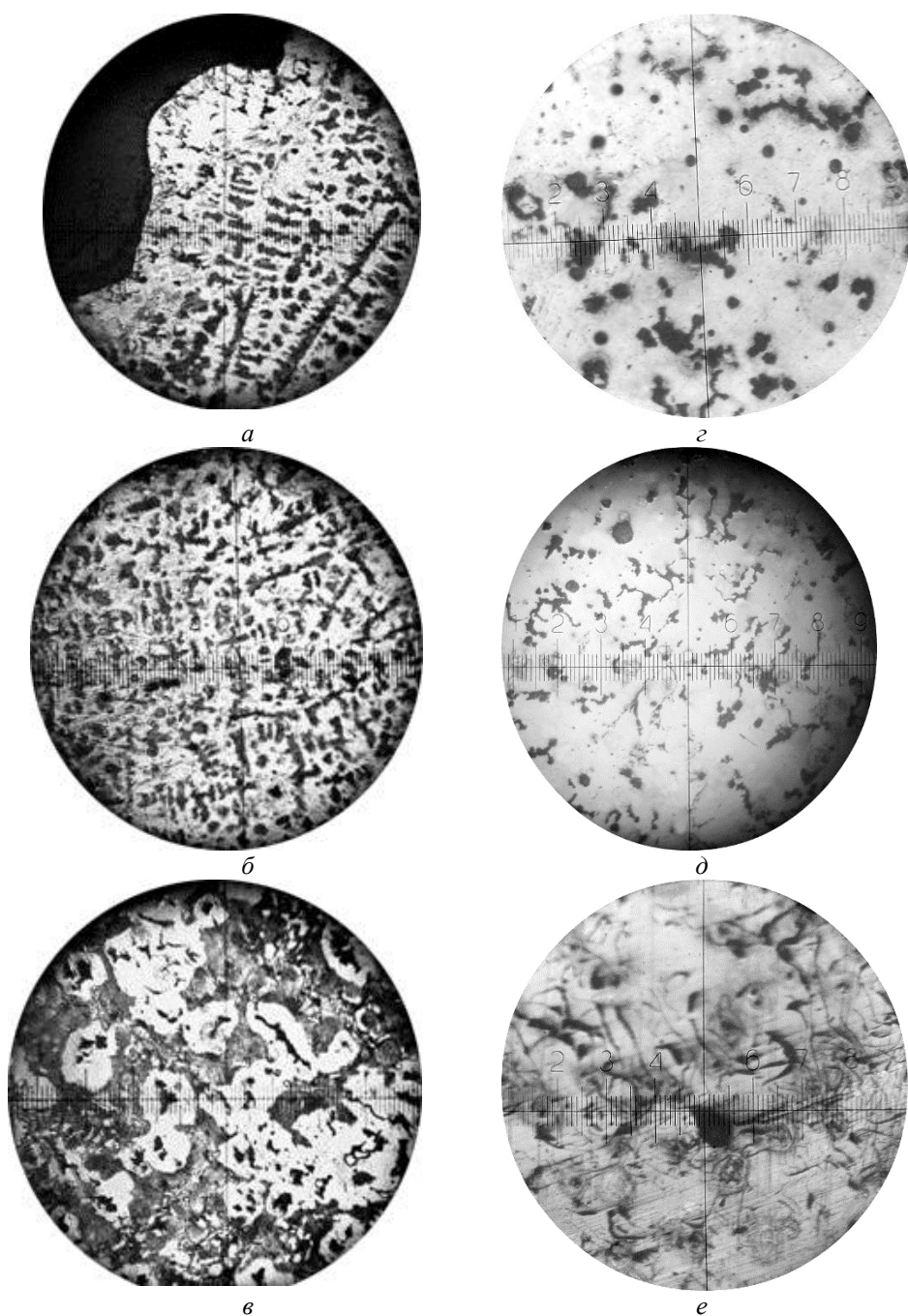


Рис. 3. Микроструктура чугуна в различных слоях одной литой заготовки,  $\times 100$ : *а*, *б*, *в* – дифференцированная по структурно-свободному цементиту; *г*, *д*, *е* – дифференцированная по форме графита

### Варианты применения дифференцированной структуры чугунных деталей

Аналогично деталям стеклоформ подавляющее большинство современных агрегатов работает в нестационарных термомеханических условиях [3].

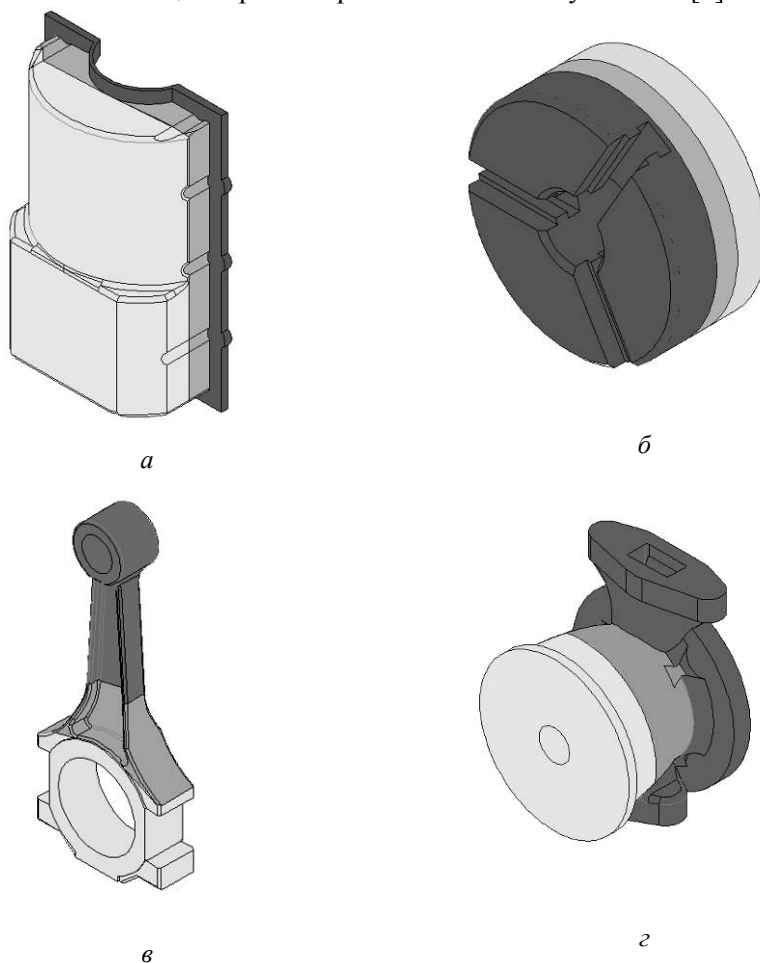


Рис. 4. Детали с дифференцированной структурой литья типа ЧШГ→ЧВГ→СЧПГ<sup>1</sup>:

*а* – толстостенные картеры; *б* – «кулаки» механообрабатывающих станков; *в* – шатуны (тяговые дышла) поршневых двигателей; *г* – гидроузлы паровых агрегатов

В качестве примеров деталей, работающих при высоких скоростях износа рабочих поверхностей и повышенных температурах, выступают рабочие механизмы двигателей внутреннего сгорания (рис. 4, *а*), станочного оборудования (рис. 4, *б*), агрегатов металлургических цехов и т. д. Конструкции данных агрегатов в большинстве случаев моносплавны. Например, шатун поршневых двигателей (рис. 4, *в*) изготавливают из легированных сталей, титановых сплавов, реже – из алюминиевых сплавов со вставками из материалов с большей термостойкостью, чем алюминий. Для меньшего износа шатунных шеек коленчатого вала между ними и шатунами помещают специальные вкладыши, которые имеют ан-

<sup>1</sup> Условно обозначено: темный цвет – зона ЧШГ, серый цвет – зона СЧПГ, переходная зона – зона ЧВГ.

тифрикционные свойства и препятствуют быстрому выходу шатуна из строя. В первую очередь это связано с характером эксплуатации шатуна: определенная моноструктура детали, отличающаяся низкой плотностью и массой (тенденция к снижению которой, с одной стороны, приводит к уменьшению инерционных нагрузок на сопрягаемые детали, с другой – балансирует на грани предела прочности материала) и выступающая в роли передатчика излишков тепловой энергии от поршня к картеру двигателя, а далее в окружающую среду, должна – с одной стороны – обладать высокой вязкостью разрушения, а с другой – высокой теплопроводностью и прочностью. Таким же требованиям должны удовлетворять детали, например, гидроузлов паровых агрегатов, в которых присутствуют рабочая часть (эксплуатирующаяся по принципу «открытия – закрытия» задвижек) и зона высокой отдачи излишков тепла в окружающую среду цеха (рис. 4, з). До настоящего времени основным материалом деталей данного типа является сталь, и замена данного материала на экономно легированный чугун с дифференцированной структурой обеспечит ряд преимуществ как готовому изделию, так и технологии его изготовления. Основными положительными эффектами применения чугуна с дифференцированной структурой литья типа ЧШГ→ЧВГ→СЧПГ по сравнению со стальными отливками будут являться [4]:

- меньшая суммарная масса агрегата – плотность такого материала на 8...12 % меньше, чем у стали, то есть произойдет облегчение конструкции узла;
- высокая жидкотекучесть сплава (в 1,1...1,5 раза выше, чем у стали), то есть литая заготовка будет менее подвержена браку по газовым раковинам и порам;
- более низкая температура заливки сплава, чем у стали, что позволит применять более дешевые формовочные материалы.

### **Заключение**

Дифференцированная структура чугуна с различным соотношением слоев (отличающихся по металлической матрице, цементиту, графиту) в одной литой заготовке детали обеспечивает ее широким комплексом свойств (ростоустойчивость, жаро-, термо-, износостойкость) без усложнения технологической цепочки изготовления детали, уменьшая себестоимость производства, повышая конкурентоспособность отечественной металлопродукции.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Александров М.В., Чистяков Д.Г.* Повышение эффективности модифицирования чугуна для отливок стеклоформ интенсификацией процесса графитообразования // *Литейщик России.* – 2013. – № 5. – С. 19–21.
2. *Леушин И.О., Чистяков Д.Г.* Влияние структурообразования и фазового состава чугуновых отливок стеклоформ на эксплуатационные свойства готовых изделий // *Известия вузов. – Черные металлы.* – 2013. – № 5. – С. 19–23.
3. *Третьяченко Г.Н., Карпинос Б.С.* Прочность и долговечность материалов при циклических тепловых воздействиях. – Киев: Наукова думка, 1990. – 256 с.
4. *Чистяков Д.Г.* Разработка технологии изготовления чугуновых отливок стеклоформ с повышенным эксплуатационным ресурсом: Автореф. ... дисс. канд. техн. наук. – Н. Новгород, 2014. – 18 с.

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2015 г.*

# PROSPECTS OF APPLICATION THE CAST IRON OF DETAILS WITH A DIFFERENTIATED CAST STRUCTURE ON THE EXAMPLE OF THE GLASS-FORMING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

**I.O. Leushin<sup>1</sup>, D.G. Chistyakov<sup>1</sup>, V.A. Volodin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod state technical University n.a. R. Y. Alexeev  
24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603650, Russian Federation

<sup>2</sup>OJSC "Normal"  
74, Litvinov st., Nizhny Novgorod, 603002, Russian Federation

*The paper describes the materials are used for the manufacture of glass forming equipment. The differentiated structure of cast iron, which allows to increase the wear resistance of the details glass-press-molds is presented. The technological chain of details production is described. The advantages of using the heterogeneous (the cross-section of the workpiece) and differentiated by structural-free cementite and graphite form-structures for details of mechanical engineering are highlighted.*

**Keywords:** differentiated structure, cast iron, casting, glass-press-mold.

УДК 621.923.2:519.673

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОЛЬЦЕ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ

**В.Г. Фокин, В.А. Дмитриев**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Разработана методика расчета методом конечных элементов остаточных напряжений в кольце роликового подшипника, образующихся при круглом врезном наружном шлифовании дорожки качения. Предполагается, что основное влияние имеют температурные деформации. Вначале решается соответствующая плоская задача нестационарной теплопроводности с подвижным источником тепла в зоне резания. На втором этапе последовательно решаются плоские нелинейные деформационные задачи для каждого шага рассмотренного выше нестационарного теплового анализа. Учитывается зависимость физических свойств от температуры. Составлены компьютерные программы, позволяющие определять температурные поля и остаточные напряжения в кольцах разных размеров при разных режимах шлифования. Приведены результаты расчета остаточных напряжений в типовом кольце.*

**Ключевые слова:** кольцо подшипника, врезное шлифование, процесс нагрева, остаточные напряжения, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

При шлифовании дорожки качения кольца подшипника происходит кратковременный местный нагрев поверхности в зоне резания на несколько сотен градусов [1, 2, 4]. Локальное температурное поле вблизи контакта имеет очень большие градиенты, в результате чего возникают значительные неоднородные температурные пластические деформации. Из-за этих деформаций при остывании в поверхностном слое создаются растягивающие остаточные напряжения. Деформациями от сил резания в условиях высокотемпературного нагрева пренебрегаем. Не учитываем также влияние фазовых превращений. Такой подход дает результаты, согласующиеся с типичными результатами экспериментального определения остаточных напряжений в поверхностных слоях шлифованных образцов методом травления [1, 3].

Остаточные напряжения в поверхностных слоях дорожки качения существенно влияют на долговечность подшипника. Компьютерный расчет этих напряжений позволяет анализировать различные режимы шлифования и оптимизировать операцию шлифования с целью повышения долговечности подшипника.

Данная работа посвящена компьютерному моделированию методом конечных элементов (МКЭ) процесса образования остаточных напряжений во внутреннем кольце роликового подшипника при круглом наружном шлифовании дорожки качения. Трехмерный анализ температурного поля при шлифовании до-

---

*Владимир Александрович Дмитриев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Технология машиностроения».*

*Владимир Григорьевич Фокин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Механика».*

рожки качения показал, что зона высоких температур и высоких температурных градиентов имеет вид узкой полоски (рис. 1) [5]. Такой характер распределения температуры позволяет заменить трехмерные конечно-элементные модели теплового и деформационного анализов на двумерные модели при сохранении достаточной точности расчета температур и остаточных напряжений. При этом значительно сокращаются объем требуемой компьютерной памяти и время расчета. Схема шлифования показана на рис. 2. Геометрия плоской модели (сектор) дана на рис. 3. Толщина сектора равна ширине дорожки  $B$ , наружный диаметр  $D_0$  равен среднему наружному диаметру дорожки качения (сечение А–А на рис. 1), конусностью дорожки качения пренебрегаем.

Поставленная задача решается в два этапа: сначала выполняется тепловой анализ, затем производится расчет остаточных напряжений.

На первом этапе решается плоская нестационарная задача теплопроводности с подвижным источником тепла для сектора, показанного на рис. 3. Торцы сектора считаются теплоизолированными. На внутренней поверхности сектора происходит конвективный теплообмен в воздушную среду, на внешней поверхности сектора происходит конвективный теплообмен в СОЖ кроме небольшого участка внешней поверхности, где имеется контакт со шлифовальным кругом и подводится тепло.

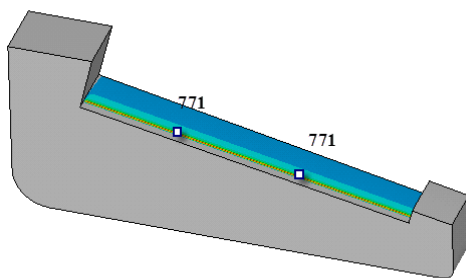


Рис. 1. Температурное поле (°C) при шлифовании

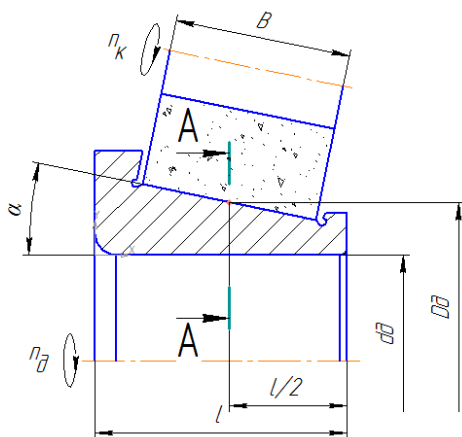


Рис. 2. Схема шлифования кольца

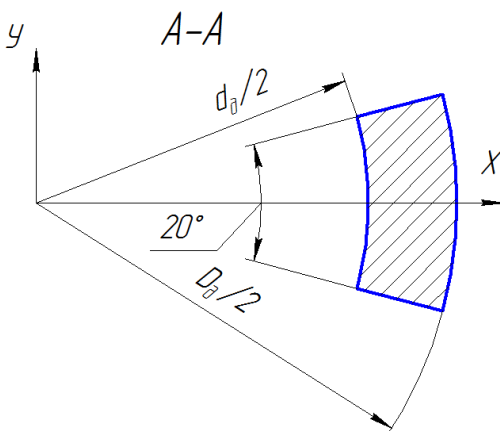


Рис. 3. Геометрия модели кольца

Этот участок перемещается по наружной окружности сектора в среднем со скоростью вращающейся детали на внешнем среднем диаметре. После прохождения поверхности сектора источник тепла исчезает на время шлифования оставшейся части кольца, затем снова повторяется цикл нагрева сектора подвижным локальным источником тепла.

С помощью плоской модели решена задача нагрева внутреннего кольца подшипника 7517A-02 при врезном шлифовании дорожки качения. Геометрия радиального сечения кольца дана на рис. 2, 3. Размеры: внутренний диаметр

$d_o = 85$  мм, наружный диаметр в среднем сечении А–А (см. рис. 1)  $D_o = 100$  мм, ширина дорожки качения (толщина сектора – модели)  $B = 27,26$  мм, угол конусности  $\alpha = 11,64^\circ$ . Материал: сталь ШХ15 HRC62 – 66; физические свойства материала при разных температурах даны в табл. 1. Свойства при температуре 1000 °С определены путем экстраполяции справочных данных. Коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении СОЖ (содовый раствор) принят как у воды 3000 Вт/м<sup>2</sup>·град, коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении воздухом принят 48 Вт/м<sup>2</sup>·град, температура внешней среды 20 °С. Режим предварительного шлифования: круг 25A16CM27K5, диаметр круга  $D_k = 600$  мм, частота вращения круга  $n_k = 1800$  об/мин, частота вращения детали – кольца подшипника  $n_o = 180$  об/мин, поперечная подача круга на врезание  $S = 0,48$  мм/мин, снимаемый припуск 0,16 мм.

Таблица 1

**Зависимость физических свойств от температуры**

| Температура Т, °С | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м*град | Теплоемкость С, Дж/кг*град |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| 20                | 7812                                 | 43                                     | 469                        |
| 200               | 7750                                 | 40                                     | 503                        |
| 400               | 7680                                 | 37                                     |                            |
| 500               | 7640                                 | 32                                     | 553                        |
| 1000              | 7460                                 | 20                                     | 699                        |

Для указанного режима рассчитываются следующие параметры.

Скорость периферии шлифовального круга:

$$V_k = \frac{\pi D_k n_k}{60} = \frac{3,1415 \cdot 0,6 \cdot 1800}{60} = 56,55 \text{ м/с}.$$

Скорость детали на наружном диаметре в среднем сечении А–А (см. рис. 1):

$$V_o = \frac{\pi D_o n_o}{60} = \frac{3,1415 \cdot 0,1 \cdot 180}{60} = 0,94245 \text{ м/с} = 56,55 \text{ м/мин}.$$

$$\text{Время одного оборота детали: } t_{об} = \frac{60}{n_o} = \frac{60}{180} = 0,33333 \text{ с}.$$

$$\text{Глубина резания на один оборот: } a = \frac{S \cdot t_{об}}{60} = \frac{0,48 \cdot 0,33333}{60} = 0,00267 \text{ мм}.$$

Теоретическая ширина контакта круга и детали:

$$l_k = \sqrt{\frac{a \cdot D_k \cdot D_o}{(D_k + D_o)}} = \sqrt{\frac{0,00267 \cdot 600 \cdot 100}{(600 + 100)}} = 0,4784 \text{ мм}.$$

Эффективная ширина контакта, учитывающая неравномерность выделения тепла в контакте, принята равной  $l_э = 0,109$  мм согласно рекомендациям авторов работы [2] и с учетом размера конечных элементов.

Время экспозиции теплового потока на эффективной ширине контакта:

$$t_э = \frac{l_э}{V_o} = \frac{0,109}{942,45} = 1,1566 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

В работе [4] для рассматриваемого кольца при таких же режимах шлифова-

ния была сделана оценка мощности шлифования:  $N \approx 4,4$  кВт.

В деталь поступает примерно 0,7 выделяемого тепла [2], поэтому тепловой поток на эффективной поверхности контакта можно определить как

$$q = \frac{0,7 \cdot N}{l_s \cdot B} = \frac{0,7 \cdot 4400}{0,109 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6}} = 10366 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

В модели тепловой источник шириной  $l_s$  с тепловым потоком  $q$  перемещается дискретно шагами величиной  $l_s$  по наружной поверхности сектора (см. рис. 3) со средней скоростью  $V_0$ , задерживаясь на каждом шаге на время  $t_s$ . Движение источника тепла по сектору кольца циклически повторяется с периодом  $t_{об}$ . Так имитируется движение контактной зоны шлифования относительно детали – кольца. На каждом шаге решается МКЭ нестационарная задача теплопроводности. При каждом обороте детали и увеличении снятого припуска картина температурного поля и максимум температуры в зоне шлифования незначительно изменяются, так как влияет общий прогрев кольца, который за один оборот детали небольшой. Результаты расчета нагрева кольца после снятия припуска 0,16 мм (20 с шлифования) представлены на рис. 4–5.

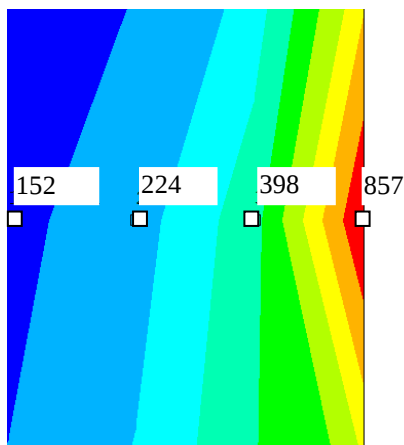


Рис. 4. Распределение температуры, °С, в зоне шлифования на 20 с

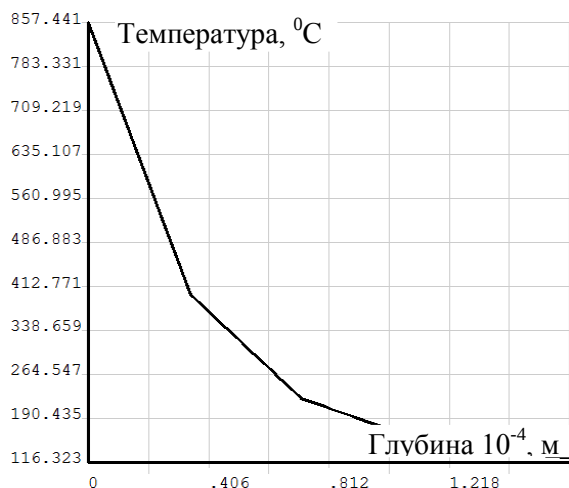


Рис. 5. График изменения температуры по глубине кольца в зоне шлифования на 20 с

На втором этапе последовательно решаются двухмерные нелинейные деформационные задачи для каждого шага рассмотренного выше нестационарного теплового анализа. Предполагается плоское деформированное состояние. Диаграмма деформирования принимается билинейной. Механические свойства закаленной стали ШХ15 в зависимости от температуры даны в табл. 2.

На рис. 6, 7 показана картина распределения напряжений в зоне шлифования на 20-й секунде, что соответствует полю температур, приведенному на рис. 4, 5.

Представленные на рис. 8, 9 остаточные напряжения определены после снятия припуска 0,16 мм, то есть после 60 полных оборотов детали и последующего остывания кольца до 20 °С.

## Зависимость механических свойств от температуры

| Температура<br>$T, ^\circ\text{C}$ | Коэф. линейного<br>расширения<br>$\alpha, 1/\text{град}$ | Модуль<br>упругости,<br>$E \cdot 10^{-5} \text{ МПа}$ | Касательный<br>модуль,<br>$E_k \text{ МПа}$ | Предел<br>текучести<br>$\sigma_t, \text{ МПа}$ |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 20                                 | 12                                                       | 2,11                                                  | 6282                                        | 1670                                           |
| 400                                | 14                                                       | 1,80                                                  | 2564                                        | 1500                                           |
| 800                                | 16                                                       | 0,60                                                  | 86                                          | 70                                             |
| 1000                               | 17                                                       | 0,05                                                  | 2                                           | 40                                             |

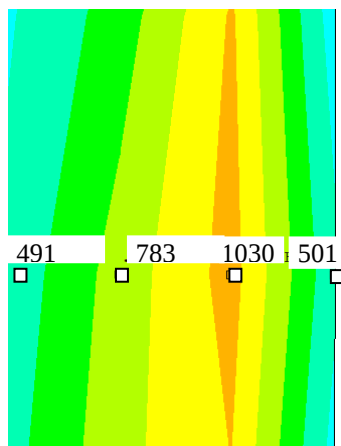


Рис. 6. Интенсивность напряжений, МПа, в зоне шлифования на 20-й с

Рис. 7. Распределение напряжений в зоне шлифования на 20-й с

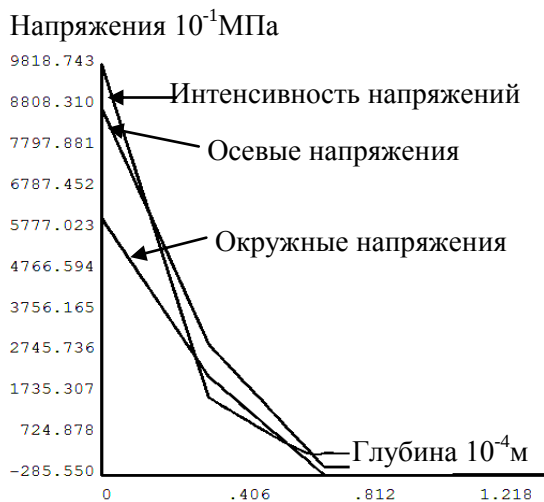
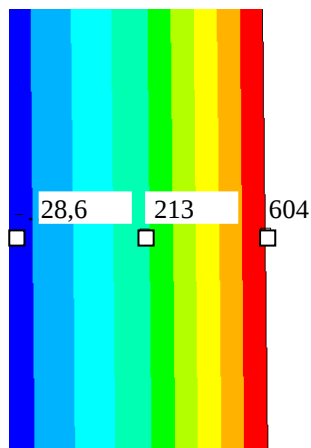


Рис. 8. Окружные остаточные напряжения, МПа, после удаления припуска 0,16 мм

Рис. 9. Распределение остаточных напряжений по глубине после удаления припуска 0,16 мм

## Заключение

1. Как показали расчеты, максимальная температура в зоне шлифования кольца из закаленной стали ШХ15 близка к 857 °С и очень быстро убывает по глубине (см. рис. 4, 5).

2. Интенсивность температурных напряжений в зоне шлифования (см. рис. 6) значительно превышает предел текучести, что ведет к образованию пластических деформаций.

3. После остывания кольца на поверхности дорожки качения создаются окружные и осевые растягивающие остаточные напряжения порядка 600...880 МПа, быстро убывающие по глубине.

4. Созданы компьютерные программы, позволяющие определять температурные поля и остаточные напряжения в кольцах роликовых подшипников разных типоразмеров при разных режимах шлифования дорожки качения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 332 с.
2. Li Y.Y., Chen Y. Моделирование процесса шлифования // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1989. – № 8. – С. 36–44.
3. Дмитриев В.А. Технологическое обеспечение точности и долговечности подшипников качения упрочнением механическими щетками и дробеструйной обработкой: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.А. Дмитриев; Сам. гос. техн. ун-т. – Самара, 1983. – 20 с.
4. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Моделирование нагрева кольца роликового подшипника при шлифовании дорожки качения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 126–131.
5. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Трехмерное моделирование МКЭ нагрева кольца подшипника при шлифовании дорожки качения / Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. «Актуальные проблемы трибологии». – 2015. – Т. 17. – № 1. – С. 92–94.

*Статья поступила в редакцию 13 февраля 2015 г.*

## DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY FINITE ELEMENT METHOD RING ROLLER BEARING RACEWAY IN GRINDING

**V.G. Fokin, V.A. Dmitriev**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The method of calculating of residual stress ring roller bearing formed in a circular plunge grinding outer raceway using the finite element method was developed. It is assumed that the main influence have temperature deformations. Initially solved the corresponding plane problem of unsteady heat conduction, with a movable source of heat in the cutting zone. In the second stage sequentially solved plane nonlinear deformation problems for each step transient thermal analysis, which was discussed above. The dependence of physical properties on temperature is considered. Compiled computer programs, which allows to determine the temperature field and residual stress in rings of different sizes with different modes of grinding. Results of calculation of residual stresses in typical rings are set.*

**Keywords:** bearing ring, plunge grinding, heating process, computer modeling, finite element method.

---

Vladimir G. Fokin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Vladimir A. Dmitriev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.