

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-124-132

^{1,*}Бондаренко Ю.А., ¹Лозовая С.Ю., ¹Шрубченко И.В., ²Явурик О.В., ¹Баранов Д.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: kdsm2002@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЦАПФЫ ОПОРНОГО УЗЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА

Аннотация. Выполнен анализ основных характеристик механических свойств твердых тел - деформаций и напряжений, возникающих при влиянии температуры на внутреннюю и внешнюю рабочие поверхности цапфы опорного узла шаровой трубной мельницы. Рассмотрены термические свойства цапфы, которые характеризуют поведение этой детали при действии тепловых полей. Установлено, что изменение напряженно-деформированного состояния цапфы опорного узла оказывает влияние на работоспособность мельничного агрегата при его эксплуатации, следовательно, данная задача важна в плане повышения эффективности производства материалов. С помощью численных методов изучен процесс деформации цапфы опорного узла, сталь 35Л ГОСТ 977-88, с учетом варьирования температурного поля в зоне сопряжения, а также исследованы напряжения сопрягаемых поверхностей. Приведены уравнения, описывающие изменения напряжений в различных направлениях при принятом варьировании параметров температуры внешней и внутренней поверхности цапфы. Представлены графические результаты моделирования. Установлено, что на цапфу оказывают воздействия силы тяжести вращающегося барабана с мелющими телами и загрузкой материала, а также изменяется температура в рабочей зоне, и ее состояние характеризуется как сложное напряженно-деформированное, эквивалентные напряжения и деформации определялись с использованием интенсивности. Проведены вычисления интенсивности деформаций по разности главных деформаций.

Ключевые слова: шаровая трубная мельница, цапфа опорного узла, баббитовый вкладыш, напряжения, деформации, численное моделирование, температура.

Введение. Шаровые трубные мельницы, ГОСТ 10141-91, представляют собой вращающиеся цилиндрические аппараты, частично заполненные мелющими телами (шарами из стали или чугуна), являются универсальным и эффективным оборудованием для тонкого измельчения в машиностроительной, горной, строительной, химической и других отраслях промышленности.

Принцип работы заключается в следующем: вращающийся барабан с мелющими шарами и загружаемым материалом создает условия для измельчения за счет нескольких механизмов – ударов падающих шаров (водопадный способ), а также трения между шарами и самим материалом (каскадный способ). При вращении мельницы шары поднимаются по внутренним стенкам барабана до определенного угла и затем падают, дробя и истирая материал [1–5].

К основным дефектам и факторам, снижающим работоспособность опорных узлов мельниц можно отнести различные механические повреждения сопрягаемой рабочей наружной поверхности цапфы: выбоины, риски, задиры, забоины, царапины, вмятины, а также износ торцевых поверхностей. В связи с возможным отклонением от горизонтального положения трубной мельницы, с появлением зазора во фланцевом соединении между барабаном трубной мельницы и

крышкой цапфового узла или искривлением оси корпуса мельницы, может возникнуть повышенное биение цапфы [6–8].

В процессе работы в смазку попадают различные включения, наличие которых приводит к снижению ее эксплуатационных характеристик и повышению рабочих температур подшипникового блока, в последствии возникают повышенные вибрации, напряжения и деформации, являющиеся факторами неравномерного износа сопрягаемых поверхностей цапфы и баббитового вкладыша подшипника, что приводит к потере работоспособности цапфы и остановке шаровой трубной мельницы для проведения ремонтных работ.

Срок службы мельниц до капитального ремонта должен составлять не менее 4,5 лет, при коэффициенте технического использования – 0,85.

Производительность шаровых трубных агрегатов характеризует много факторов. В таблице 1 приведена номинальная производительность цементных трубных мельниц типа МЦ, которые предназначены для помола цементного клинкера с добавками в производстве самого цемента.

Таблица 1

Номинальная производительность, т/ч (пред. откл. ±15 %) цементных мельниц

Наименование основных параметров и размеров	Нормы по типоразмерам					
	2,0×10,5	2,6×13,0	3,2×15,0	4,0×13,5	3,0×14,0	5,0×16,5
Тип цементной мельницы	2,0×10,5	2,6×13,0	3,2×15,0	4,0×13,5	3,0×14,0	5,0×16,5
Номинальная производительность, т/ч	10,0	27	50,0	100,0	43,0	175,0

Методология. Проблема заключается в том, что в процессе эксплуатации шаровых трубных мельниц происходит износ опорных подшипниковых узлов, причем в большинстве случаев это неравномерный износ вкладышей подшипников скольжения, которые изготовлены из баббита. Для определения основных причин нарушения работоспособности мельниц связанных с износом баббитовых вкладышей были проведены статистические исследования на предприятиях промышленности строительных материалов, цементной промышленности. Необходимо минимизировать потери, связанные с вынужденными простоями оборудования в ремонте. В соответствии с этим следует определить какие основные факторы влияют на износ баббитовых вкладышей, установить наиболее весомые причины, приводящие к появлению напряжений и деформаций, влекущих за собой повышение удельных нагрузок поверхности сопряжения цапф опорного подшипникового узла. При этом целесообразным будет использование численного моделирования напряжений и деформаций цапфы с учетом температурного поля, математического пакета для аналитических вычислений Maple, с варьированием параметров (температуры внутренней и внешней поверхностей цапфы опорного блока) в заданных границах.

Основная часть. Износ сопрягаемых поверхностей цапфы и баббитового вкладыша в большинстве случаев связан с повышенными температурами в зоне контакта, результатом которых является неуравновешенность и вибрации, приводящие к появлению напряжений, деформаций и повышенным удельным нагрузкам (рис. 1). Трансформация напряженно-деформированного состояния цапфы опорных подшипниковых узлов зависит от температур ее внутренней и внешней поверхностей. Анализ изменения напряжений и деформаций при варьировании температурных параметров цапфы цементной мельницы проводится численным методом, поэтому для исследований следует задать значения постоянных параметров цапфы. Изменение напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы действительно зависит от температурных параметров как внутренней, так и внешней поверхностей цапфы. Температура влияет на механические свойства материала цапфы, включая

упругопластические характеристики, и, соответственно, на величину и распределение напряжений и деформаций.

Численный анализ изменения напряженно-деформированного состояния при различных температурах проводится с использованием заданных значений постоянных и параметров материала цапфы. В таких расчетах учитываются тепловые нагрузки, температурные градиенты, а также тепловое расширение и связанные с этим деформации и внутренние напряжения. Это позволяет комплексно оценить влияние изменения температуры на надежность и долговечность цапфы.

При этом особо важна корректная постановка граничных условий и учитывание теплового режима шаровой мельницы, где температура внутренней среды может достигать высоких значений, влияя на нагрев и деформацию конструктивных элементов, включая цапфы. Методы численного моделирования учитывают указанные параметры, применяя полную систему уравнений равновесия и законов деформирования для цапфы в реальных условиях работы мельницы.

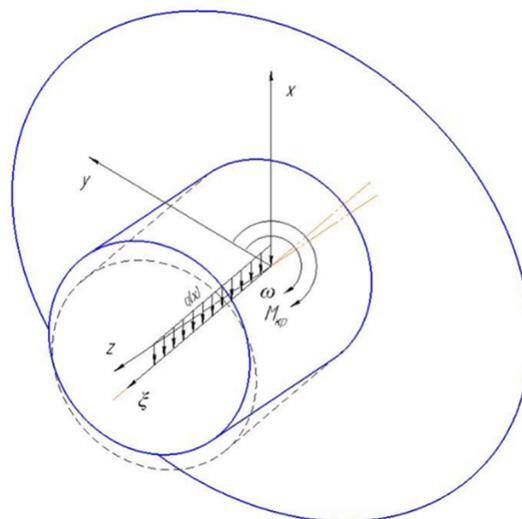


Рис. 1. Расчетная схема изгиба и вращения цапфы

Напряжения рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в азимутальном направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы определяется по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\alpha E (T_{R_2} - T_{R_1})}{1 - \nu} \left[\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{1}{2 \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] \quad (1)$$

где, α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$; E – модуль упругости, МПа; ν – коэффициент Пуассона; T_{R_1} и T_{R_2} – температура внутренней и внешней поверхности цапфы соответственно, $^\circ\text{C}$; R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней поверхности цапфы соответственно, м.

Напряжения внешней поверхности в аксиальном направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы определяются по формуле:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\alpha}{2(1-\nu)} \left[\frac{(1-3\nu)(R_2^2 T_{R_2} - R_1^2 T_{R_1}) - (1+\nu)(R_1^2(T_{R_1} - T_{R_2}) + T_{R_2}(R_2^2 - R_1^2))}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(1-\nu)(T_{R_2} - T_{R_1})}{\ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] \quad (3)$$

Деформацию рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в радиальном

$$\varepsilon_r = \frac{\alpha}{2(1-\nu)} \left[\frac{(1-3\nu)(R_2^2 T_{R_2} - R_1^2 T_{R_1}) + (1+\nu)T_{R_2}(R_2^2 - R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{2\nu(T_{R_2} - T_{R_1})}{\ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] \quad (4)$$

Деформация рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в аксиальном направлении вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_z = \frac{\alpha \left[(T_{R_2} - T_{R_1})(R_2^2 - R_1^2) + 2(R_1^2 T_{R_1} - R_2^2 T_{R_2}) \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right]}{2(R_2^2 - R_1^2) \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} + \varepsilon_{z_0} \quad (5)$$

Математические зависимости (1–5) позволяют рассчитать значения напряженно-деформированного состояния внешней рабочей сопрягаемой поверхности цапфы.

Была исследована шаровая трубная цементная мельница диаметром 3,2 м и длиной 15 м с геометрическими параметрами цапфы опорного подшипникового узла диаметром 1,4 м и длиной 0,92 м. Рассмотренная цапфа имеет радиусы внутренней поверхности $R_1 = 0,575$ м и внешней поверхности $R_2 = 0,7$ м.

Цапфа шаровой трубной мельницы может выйти из строя в процессе ее эксплуатации из-за развития трещин, вызванными дефектами литья, износа внутренней поверхности и других факторов [9–12].

Цапфа относится к деталям, работающим под действием средних статических и динамических нагрузок. В соответствии с ГОСТ 977-88 для изготовления цапф в качестве материала используется сталь 35Л. По классификации эта сталь относится к нелегированной стали для отливок, для дальнейших расчетов примем следующие значения: коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, модуль упругости $E = 2,01 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент линейного расширения $\alpha = 12 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Для определения напряжений и деформаций требуется задать температуры внутренней и внешней сопрягаемой с баббитовым вкладышем поверхностей цапфы опорного узла. Температура подаваемого цементного клинкера и доба-

$$\sigma_z = \frac{\alpha E (T_{R_2} - T_{R_1})}{1-\nu} \left[\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{1}{2 \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] + \sigma_{z_0} \quad (2)$$

Деформацию рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в азимутальном направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы можно определить по формуле:

направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы можно определить по формуле:

вок оказывает влияние на температуру внутренней поверхности цапфы. При определении температуры на внутренней поверхности загрузочной цапфы, следует учесть, что температура поступающего в цапфу шаровой трубной мельницы цементного клинкера и добавок находится в интервале $T_{R_1} = 70 \dots 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, при определении температуры на внутренней поверхности разгрузочной цапфы, учитываем, что температура подающегося цементного клинкера и добавок находится в интервале $T_{R_1} = 100 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

При мониторинге температуры внешней поверхности цапфы опорного узла мельницы используются термопары, размещенные у галтелей сопрягаемой рабочей поверхности цапфы (Рис. 2).

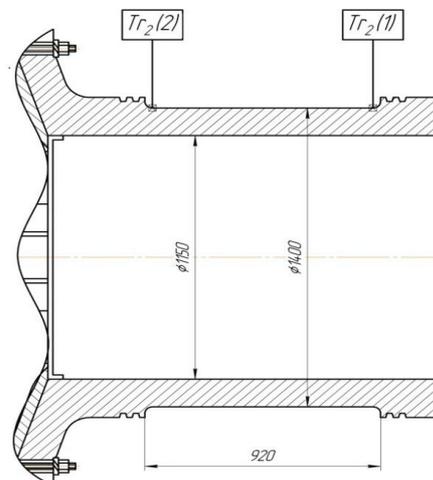


Рис. 2. Мониторинг температуры сопрягаемой рабочей поверхности цапфы

Температура сопрягаемой рабочей поверхности загрузочной и разгрузочной цапф колеблется при измерении ее в продольном направлении вдоль оси. Температура, измеряемая для сопрягаемой рабочей поверхности загрузочной цапфы подшипникового опорного узла, варьируется в интервалах $T_{R_2}(1) = 30 \dots 40^\circ\text{C}$, $T_{R_2}(2) = 40 \dots 45^\circ\text{C}$. Температура, измеренная на сопрягаемой рабочей поверхности разгрузочной цапфы, находится в пределах $T_{R_2}(1) = 40 \dots 50^\circ\text{C}$, $T_{R_2}(2) = 50 \dots 65^\circ\text{C}$.

Для решения уравнений (1-4) применяли математический пакет для аналитических вычислений Maple, при этом изменение параметров варьирования (температуры внутренней и внешней поверхностей цапфы опорного блока находилось в границах: $T_{R_1} = 70 \dots 150^\circ\text{C}$, $T_{R_2} = 30 \dots 70^\circ\text{C}$.

Результат численного моделирования напряжений и деформаций цапфы с учетом температурного поля в соответствии с уравнениями (1-4), представлен в виде графических зависимостей на рисунках 3 – 7.

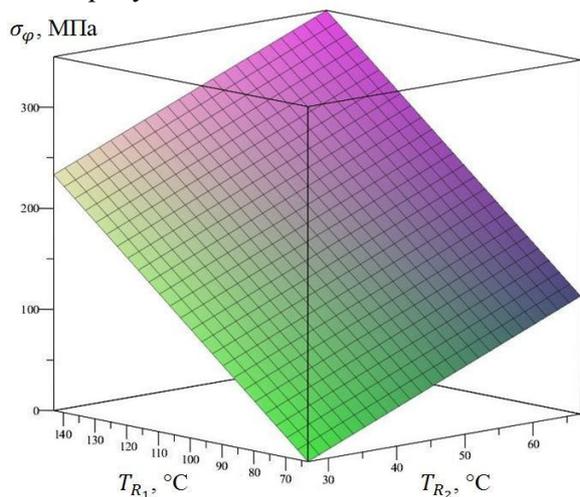


Рис. 3. Изменение напряжений внешней сопрягаемой поверхности цапфы опорного узла при изменениях температуры внешней и внутренней поверхности в аксиальном направлении

Анализ графических зависимостей изменения напряжений внешней сопрягаемой поверхности цапфы опорного узла показывает, что напряжения в аксиальном направлении немного превышают напряжения в азимутальном направлении. Это связано с дополнительной нагрузкой силы тяжести, которая действует именно в аксиальном направлении и составляет около 0,1% от общего напряжения. В то время как азимутальные напряжения формируются главным образом под воздействием сил вращения и трения.

Такое распределение напряжений обусловлено тем, что в аксиальном направлении цапфа воспринимает создаваемую гравитационную нагрузку, усиливающую изгибающие моменты и

вызывающую более высокие напряжения, в то время как в азимутальном направлении преобладают нагрузки, связанные с кручением и касательными силами.

Таким образом, при проектировании и анализе конструкции цапф шаровых мельниц необходимо уделять внимание как аксиальным, так и азимутальным напряжениям, особенно учитывая дополнительные нагрузки силы тяжести, что влияет на долговечность и надежность опорного узла.

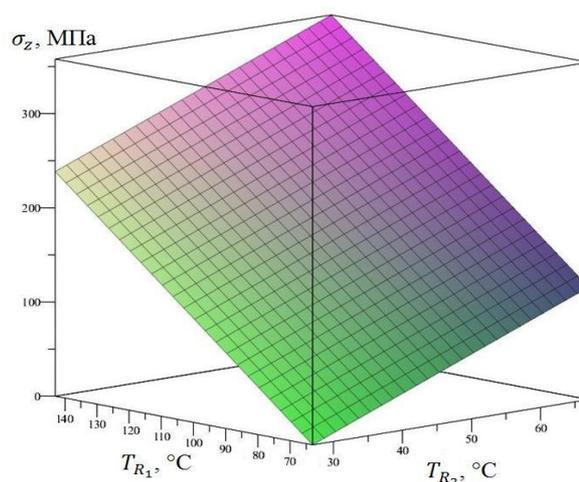


Рис. 4. Изменение напряжений внешней сопрягаемой поверхности цапфы при изменении температур внешней и внутренней поверхности в аксиальном направлении

Анализ графиков показывает, что напряжения на внешней рабочей поверхности цапфы шаровой мельницы действительно увеличиваются с повышением температуры, как на внешней, так и на внутренней поверхности контакта цапфы. Это связано с тем, что при повышении температуры меняются физико-механические характеристики материала цапфы, увеличивается тепловое расширение, что в совокупности с действием сил вращения и силы тяжести усугубляет напряженно-деформированное состояние.

Повышение температуры приводит к росту внутренних напряжений и деформаций, что способствует увеличению удельных нагрузок на рабочую поверхность. Такой режим нагрузки способствует ускоренному износу, повышению вибраций и неустойчивости, что негативно влияет на долговечность и надежность опорных подшипников и всей мельницы.

Для нахождения эквивалентных напряжений и деформаций внешней сопрягаемой поверхности цапфы шаровой трубной мельницы целесообразно использовать интенсивность напряжения. Это обусловлено тем, что напряженно-деформированное состояние цапфы формируется под воздействием комплексного сочетания сил:

силы вращения, силы тяжести и изменяющейся температуры.

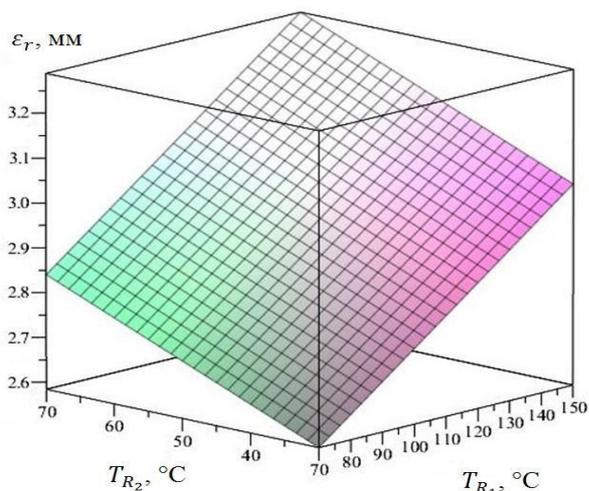


Рис. 5. Деформация внешней поверхности цапфы опорного узла при изменениях температуры в радиальном направлении внешней и внутренней поверхности

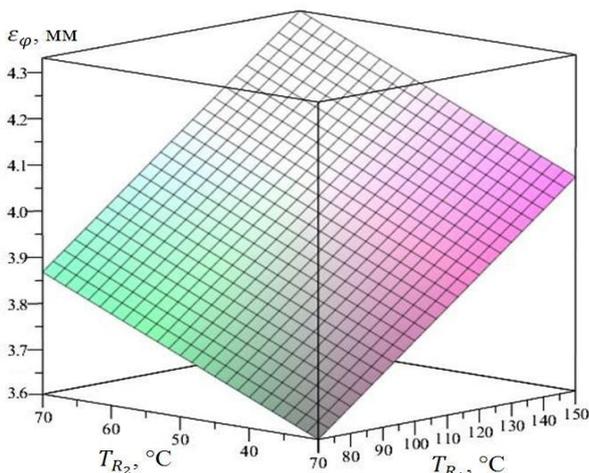


Рис. 6. Изменение деформации внешней поверхности цапфы опорного узла при изменениях температур в азимутальном направлении внешней и внутренней поверхности

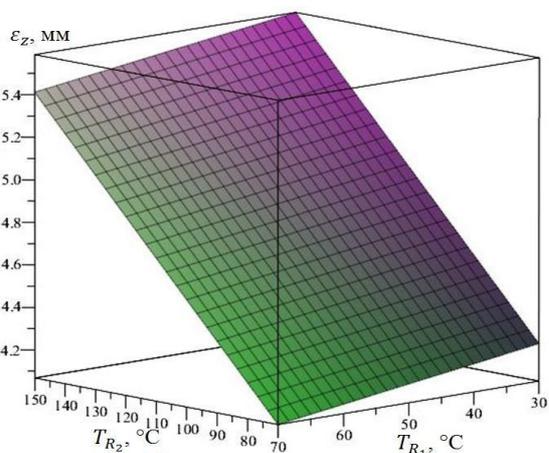


Рис. 7. Деформация внешней поверхности цапфы опорного узла при изменениях температур в аксиальном направлении внешней и внутренней поверхности

Интенсивность напряжения позволяет учесть все виды напряжений, возникающих в материале цапфы (в том числе нормальные и касательные), и получить единую величину, характеризующую степень нагружения и риск возникновения пластических деформаций или разрушений. Применение интенсивности напряжения в расчетах базируется на комплексной математической модели, включающей баланс сил, уравнения деформирования и температурные эффекты.

Таким образом, использование интенсивности напряжения как базового параметра при расчетах напряженно-деформированного состояния позволяет адекватно оценить механическое состояние цапфы, принять меры по предотвращению возможных повреждений и оптимизировать режимы эксплуатации и техническое обслуживание мельницы. Для определения интенсивности напряжения воспользуемся выражением [13–18], согласно критерию Мора:

$$\sigma_i = \lambda_1 \sigma_z + \lambda_2 \sigma_\varphi \quad (6)$$

где λ_1, λ_2 – постоянные материала.

Вводя условия кручения $\sigma_z = \tau_{-1}, \sigma_\varphi = 0$, при изгибе $\sigma_z = 0, \sigma_\varphi = \sigma_{-1}$, (где τ_{-1} – предел прочности при кручении; σ_{-1} – предел прочности при изгибе) в формулу (6), получим:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \lambda_1 \tau_{-1}; \sigma_{\text{ЭКВ}} = \lambda_2 \sigma_{-1} = \tau_{-1} \quad (7)$$

Определим λ_1, λ_2 (постоянные материала), используя (7):

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} \quad (8)$$

Тогда математическую зависимость (6) с использованием формулы (8), можно представить:

$$\sigma_i = \sigma_z + \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} \sigma_\varphi \quad (9)$$

или

$$\sigma_i = \sigma_z + \chi \sigma_\varphi \quad (10)$$

где $\chi = \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}}$.

Тогда интенсивность деформаций определяется из разности сумм квадратов деформаций [19–22]:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2} \quad (11)$$

Выводы. Износ рабочих поверхностей цапф опорных подшипниковых узлов шаровых трубных мельниц обусловлен высокими температурами, что ведет к неуравновешенности и вибрациям. Вибрации, возникающие под воздействием высоких температур, усиливают напряжения и деформации, тем самым увеличивая удельные нагрузки на поверхности цапф. Это способствует

ускоренному износу, снижая срок службы опорных подшипников и всей мельницы.

Температурное воздействие влияет на внутренние и внешние поверхности цапфы, изменяя напряженно-деформированное состояние. Применение численных методов позволяет исследовать это влияние, моделируя колебания температур и вычисляя распределение напряжений и деформаций в трех направлениях на рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы. Получены математические зависимости для оценки параметров напряжений и деформаций с учетом температурного поля, а также формулы для определения интенсивности напряжений.

Графические зависимости, построенные на основе этих расчетов, помогут визуализировать изменения напряжений и деформаций под воздействием температур, что важно для прогноза работоспособности и предотвращения преждевременного износа цапф в условиях эксплуатации с высоким тепловым режимом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банит Ф.Г., Несвежский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М., «Машиностроение», 1975. 318с.
2. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М., «Высшая школа», 1971. 382с.
3. Бауман В.А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М., «Машиностроение», 1981. 326с.
4. Гологорский Е.Г., Доценко А.И., Ильин А.С. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии. М.: Архитектура, 2006. 503 с.
5. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Основные процессы в производстве строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. 550 с.
6. Бондаренко Ю.А., Федоренко М.А., Погонин А.А., Схиртладзе А.Г., Санина Т.М. Бездемонтажное восстановление крупногабаритных агрегатов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. №11. С. 11–14.
7. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Экспериментальное исследование восстановления поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 122–127. DOI: 10.12737/22353
8. Бестужева О.В., Бондаренко Ю.А., Баранов Д.С., Романович А.А. Исследование ремонтного восстановления поверхностей вращения различной конфигурации большого диаметра // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №12. С. 116–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124
9. Бондаренко Ю.А., Ханин С.И., Бестужева О. В. Математическое описание напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы под действием силы тяжести и вращения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. №3. С. 128-133. DOI: 10.34031/article_5ca1f6356f67c4.15287599
10. Федоренко Т.М., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Восстановление работоспособности цапф помольных мельниц с применением переносного станка // Технология машиностроения. 2009. № 3. С. 20–21. DOI: 10.12737/article_59a93b0ac85999.41172542
11. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Определение рациональных параметров ротационной обработки поверхностей вращения при восстановлении крупногабаритных деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 121–125. DOI: 10.12737/22647
12. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А., Санина Т.М. Влияние колебаний валов на точность обработки на нестационарных станках // XI Международная конференция по машиностроению г. Томск, Россия 04-06 2017г. С. 2–7.
13. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Москва, 2001. 920 с.
14. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Москва, 1975. 833 с.
15. Бояршинов М.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния вращающегося длинного цилиндра // Вестник ПНИПУ. 2013. №1. С. 25–38.
16. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
17. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев, 1976. 416 с
18. Светлицкий В.А. Строительная механика машин. Механика стержней. В 2 томах. М.: Физматлит, 2009. 408 с.
19. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопrotивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М.: Инфра-М, 2011. 640 с.
20. Дудяк А.И., Сахнович Т.А. Прикладная теория упругости. М.: Издательство Гревцова, 2010. 164 с.
21. Бардзокас Д.И., Фильштинский Л.А., Фильштинский М.Л. Актуальные проблемы свя-

занных физических полей в деформируемых телах. Математический аппарат физических и инженерных наук. Том 1. М.: Москва, 2010. 864 с.

22. Тимошенко С.П., Дж. Гульер. Теория упругости. Москва, 1975. 560 с.

Информация об авторах

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: kds2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Лозовая Светлана Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: kds2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Шрубченко Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Явурик Ольга Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.05.2025 г.

© Бондаренко Ю.А., Лозовая С.Ю., Шрубченко И.В., Явурик О.В., Баранов Д.С., 2026

^{1,}Bondarenko Yu.A., ¹Lozovaya S.Yu., ¹Shrubchenko I.V., ²Yavurik O.V., ¹Baranov D.S.*

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Belgorod State National Research University

**E-mail: kds2002@mail.ru*

STUDY OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF THE TRUNNION OF THE SUPPORT UNIT USING THE NUMERICAL METHOD

Abstract. *The article presents the analysis of the main characteristics of mechanical properties of solids – deformations and stresses arising under the influence of temperature on the internal and external working surfaces of the journal of the support unit of a ball tube mill. The article considers the thermal properties of the journal, which characterize the behavior of this part under the action of thermal fields. It is established that a change in the stress-strain state of the journal of the support unit affects the performance of the mill unit during its operation, therefore, this problem is important in terms of increasing the efficiency of material production. Using numerical methods, the deformation process of the journal of the support unit, steel 35L GOST 977-88, was studied taking into account the variation of the temperature field in the mating zone, and the stresses of the mating surfaces were investigated. Equations are given that describe stress changes in different directions with the adopted variation of the temperature parameters of the external and internal surfaces of the journal. Graphical results of the modeling are presented. It was found that the journal is affected by the gravity forces of the rotating drum with grinding bodies and material loading, and the temperature in the working area changes, and its state is characterized as complex stress-strain, equivalent stresses and strains were determined using intensity. Calculations of the strain intensity were performed based on the difference in the main strains.*

Keywords: *ball tube mill, journal of support unit, babbitt insert, stress, deformation, numerical modeling, temperature.*

REFERENCES

1. Banit F.G., Nesvezhsky O.A. Mechanical equipment of cement plants. [Mekhanicheskoye oborudovaniye tsementnykh zavodov]. Moscow, "Mashinostroenie", 1975. 318 p. (rus)
2. Sapozhnikov M.Ya. Mechanical equipment of enterprises producing building materials, products

and structures. [Mekhanicheskoye oborudovaniye predpriyatiy stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruksiy]. Moscow, "Higher School", 1971. 382 p. (rus)

3. Bauman V.A. Mechanical equipment of enterprises producing building materials, products and structures. [Mekhanicheskoye oborudovaniye

predpriyatiiy stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy]. Moscow, "Mashinostroenie", 1981. 326 p. (rus)

4. Gologorsky E.G., Dotsenko A.I., Ilyin A.S. Operation and repair of equipment at enterprises of the construction industry. [Ekspluatatsiya i remont oborudovaniya predpriyatiiy strojindustrii]. M.: Architecture, 2006. 503 p. (rus)

5. Bogdanov V.S., Ilyin A.S., Semikopenko I. A. Basic processes in production of building materials. [Osnovnyye protsessy v proizvodstve stroitel'nykh materialov] Belgorod: Publishing house of BSTU named after V. G. Shukhov, 2008. 550 p. (rus)

6. Bondarenko Yu.A., Fedorenko M.A., Pogonin A.A., Skhirtladze A.G., Sanina T.M. Non-dismantling restoration of large-sized units [Bezdemontazhnoe vosstanovlenie krupnogabaritnykh agregatov]. Repair, restoration, modernization. 2009. No.11. Pp. 11–14. (rus)

7. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Experimental study of restoration of the surface of revolution of large-sized parts of industrial equipment [Experimentality issledovaniye vosstanovleniya poverkhnostey vrascheniya krupnykh detaley promyshlennogo oborudovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G.Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 122–127. (rus)

8. Bestuzheva O.V., Bondarenko Yu.A., Baranov D.S., Romanovich A.A. Study of repair restoration of surfaces of revolution of various configurations of large diameter [Issledovanie remontnogo vosstanovleniya poverkhnostey vrashcheniya razlichnoy konfiguratsii bol'shogo diametra]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 116–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124 (rus)

9. Bondarenko Yu.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. Mathematical description of the stress-strain state of a ball mill journal under the action of gravity and rotation [Matematicheskoye opisaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osi sharovoy mel'nitsy pod deystviyem sily tyazhesti i vrashcheniya]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 3. Pp. 128–133. DOI: 10.34031/article_5ca1f6356f67c4.15287599 (rus)

10. Fedorenko T.M., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu. A. Restoration of the operability of grinding mill journals using a portable machine [Vosstanovlenie pabotosposobnosti capf pomol'nykh mel'nic s ppimeneniem pepenosnogo stanka]. Technology of mechanical engineering. 2009. No. 3. Pp. 20–21. DOI: 10.12737/article_59a93b0ac85999.41172542 (rus)

11. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Determination of rational parameters of rotary machining of surfaces of revolution

during restoration of large-sized parts [Opreделение racional'nykh parametrov rotacionnoj obrabotki poverkhnostey vrashcheniya pri vosstanovlenii krupnogabaritnykh detaley]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 12. Pp. 121–125. (rus)

12. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Pogonin A.A., Sanina T.M. Influence of shaft vibrations on the accuracy of machining on non-stationary machines [Vliyanie kolebanij valov na tochnost' obrabotki na nestacionarnykh stankah]. XI International Conference on Mechanical Engineering Tomsk, Russia 04-06 2017. Pp. 2–7. (rus)

13. Anurev V.I. Handbook of the mechanical engineer. [Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya]. Moscow, 2001. 920 p. (rus)

14. Filin A. P. Applied mechanics of a solid deformable body. [Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruемого tela]. Moscow, 1975. 833 p. (rus)

15. Boyarshinov M.G. Evaluation of the stress-strain state of a rotating long cylinder [Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vrashchayushchegosya dlinnogo tsilindra]. Bulletin of PNIPU. 2013. No. 1. Pp. 25–38. (rus)

16. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Strength calculation of machine parts. [Raschet prochnosti detaley mashin]. Moscow: Mechanical Engineering, 1979. 702 p. (rus)

17. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformation and strength of materials under complex stress state. [Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii]. Kyiv, 1976. 416 p. (rus)

18. Svetlitsky V.A. Structural mechanics of machines. Mechanics of rods. In 2 volumes. [Stroitel'naya mekhanika mashin. Mekhanika sterzhney. V 2-kh tomakh]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 408 p. (rus)

19. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Strength of materials with the basics of elasticity and plasticity theory. [Soprotivleniye materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti]. M.: Infra-M, 2011. 640 p. (rus)

20. Dudyak A.I., Sakhnovich T.A. Applied Theory of Elasticity. [Prikladnaya teoriya uprugosti]. M.: Grevtsov Publishing House, 2010. 164 p. (rus)

21. Bardzokas D.I., Filshitsky L.A., Filshitsky M.L. Actual Problems of Coupled Physical Fields in Deformable Bodies. Mathematical Apparatus of Physical and Engineering Sciences. [Aktual'nye problemy svyazannykh fizicheskikh poley v deformiruemykh telakh. Matematicheskij apparat fizicheskikh i inzhenernykh nauk]. Vol. 1. M.: Moscow, 2010. 864 p. (rus)

22. Timoshenko S.P., Gullier J. Theory of Elasticity. [Teoriya uprugosti]. Moscow, 1975. 560 p. (rus)

Information about the authors

Yulia, Anatolyevna B. DSc. E-mail: kdsm2002@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Lozovaya, Svetlana Y. DSc. E-mail: kdsm2002@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia

Olga, Vasilyevna Y. PhD. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia.

Shrubchenko, Ivan V. DSc. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46

Baranov, Denis S. Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Received 21.05.2025

Для цитирования:

Бондаренко Ю.А., Лозовая С.Ю., Шрубченко И.В., Явурик О.В., Баранов Д.С. Изучение напряжений и деформаций цапфы опорного узла с применением численного метода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 124–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-124-132

For citation:

Bondarenko Yu.A., Lozovaya S.Yu., Shrubchenko I.V., Yavurik O.V., Baranov D.S. Study of stresses and deformations of the trunnion of the support unit using the numerical method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 124–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-124-132