ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ МЕЛЬНИЦ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Акмал Жуманазаров
соискатель Навоиского государственного горно-металлургического университета, PhD по техническим наукам,
E-mail: ar.jumanazarov@gmail.com
Илхом Эгамбердиев
заведующий кафедры "Локализация производственных процессов" Навоиского государственного горно-металлургического университета, доктор технических наук, профессор,
E-mail: Ilkhom1997@mail.ru,
Tel: +998936124560
Маъруф Саибов
докторант кафедры "Технология машиностроения" Навоиского государственного горно-металлургического университета,
E-mail: m.saibov94@gmail.com,
Tel: +998900855865
Улугбек Очилов
докторант кафедры "Технология машиностроения" Навоиского государственного горно-металлургического университета,
E-mail: ulugbek_ochilov94@mail.ru,
Tel: +998915495655

Аннотация. Редуктор является ключевым звеном приводной системы мельниц, обеспечивающим передачу крутящего момента от электродвигателя к барабану. В условиях переработки твёрдых и абразивных руд редуктор работает под воздействием переменных динамических нагрузок, возникающих в результате ударных импульсов и вибраций, передающихся через вал-шестерню. Эти нагрузки приводят к усталостному разрушению зубчатого зацепления, снижению износостойкости и преждевременному выходу узла из строя. В рамках данного исследования выполнено полное численное моделирование поведения редуктора шаровой мельницы с использованием метода конечных элементов, включая анализ напряжённо-деформированного состояния, распределения нагрузок и резонансных характеристик. Определены зоны концентрации напряжений в зубьях, переходных участках валов и на сопрягаемых поверхностях корпуса. Полученные данные позволили выявить наиболее уязвимые элементы конструкции и разработать рекомендации по улучшению геометрии.

ISSN 3030-3907

Результаты моделирования являются основой для повышения надёжности и виброустойчивости редукторов, используемых в составе дробильно-размольного оборудования.

Ключевые слова: редуктор, шаровая мельница, зубчатое зацепление, вибрации, динамические нагрузки, МКЭ, износ, усталость, надёжность.

Аннотация. Редуктор — бу электродвигателдан барабанга айланма моментни узатишни таъминловчи мельницаларнинг ҳаракатлантирувчи тизимининг асосий бўғини ҳисобланади. Қаттиқ ва абразив рудаларни қайта ишлаш шароитида редуктор вал-шестерня орқали узатиладиган зарба импульслари ва вибрациялар натижасида вужудга келадиган ўзгарувчан динамик юкламалар таъсирида ишлайди. Бу юкламалар тишли улашмаларнинг чарчоқдан емирилиши, кийилишга чидамлиликнинг пасайиши ва узелнинг муддатидан олдин ишдан чиқишига олиб келади. Ушбу тадқиқот доирасида шарли мельница редукторининг тўлиқ сонли моделлаштирилиши амалга оширилди — у ниҳоявий элементлар усули (МКЭ) асосида, кучланиш-деформация ҳолати, юклама тақсимоти ва резонанс хусусиятлари таҳлилини ўз ичига олади. Тишларда, валларнинг ўтиш қисмларида ва корпуснинг туташган юзаларда кучланишлар концентрацияси мавжуд бўлган ҳудудлар аниқланди. Олинган маълумотлар асосида конструкциянинг энг заиф элементлари аниқланди ва геометрияни такомиллаштириш бўйича тавсиялар ишлаб чиқилди. Моделлаштириш натижалари майдалаш ва парчалаш ускуналарида қўлланиладиган редукторларнинг ишончлилигини ва вибрацияга чидамлилигини ошириш учун асос бўлади.

Калит сўзлар: редуктор, шарли мельница, тишли улашма, вибрациялар, динамик юкламалар, МКЭ, кийилиш, чарчоқ, ишончлилик.

Abstract. The gearbox is a key component of the mill's drive system, responsible for transmitting torque from the electric motor to the drum. Under conditions of processing hard and abrasive ores, the gearbox operates under variable dynamic loads resulting from impact impulses and vibrations transmitted through the pinion shaft. These loads cause fatigue failure of the gear mesh, reduced wear resistance, and premature failure of the assembly. This study presents a comprehensive numerical simulation of the behavior of a ball mill gearbox using the finite element method (FEM), including analysis of stress-strain states, load distribution, and resonance characteristics. Stress concentration zones were identified in the gear teeth, shaft transitions, and mating surfaces of the housing. The obtained data made it possible to identify the most vulnerable structural elements and develop recommendations for improving the geometry. The simulation results form the

ISSN 3030-3907

basis for enhancing the reliability and vibration resistance of gearboxes used in crushing and grinding equipment.

Keywords: gearbox, ball mill, gear mesh, vibrations, dynamic loads, FEM, wear, fatigue, reliability.

Введение

Редуктор шаровой мельницы представляет собой один из наиболее нагруженных элементов приводной системы, обеспечивающий передачу крутящего момента от электродвигателя к барабану. При эксплуатации в условиях переработки твёрдых и абразивных руд он подвергается воздействию переменных динамических нагрузок, формирующихся в результате ударных импульсов от мелющих тел, а также вибраций, передающихся через вал-шестерню [1, 2]. Эти воздействия провоцируют усталостное разрушение зубчатых зацеплений, снижение износостойкости контактных поверхностей и, как следствие, преждевременный выход узла из строя [3].

Анализ отказов оборудования на горно-металлургических предприятиях показывает, что выход из строя редуктора часто становится причиной внеплановых остановок технологического процесса и существенных производственных потерь [4, 5]. Повышенные требования к надёжности и ресурсу узлов редуктора в современных условиях эксплуатации требуют внедрения более совершенных подходов к их расчёту и оптимизации конструкции. Ограничения традиционных инженерных методов расчёта, основанных на статической нагрузке и упрощённых допущениях, не позволяют учесть всю сложность реальных рабочих условий. В этой связи численные методы анализа, прежде всего метод конечных элементов (МКЭ), становятся важнейшим инструментом при проектировании и верификации конструкций редукторов [6]. Метод позволяет моделировать распределение напряжений, деформаций и резонансных эффектов, что особенно важно при наличии циклических и ударных нагрузок. В ряде работ [7, 8] было показано, что использование МКЭ для анализа шестерён, валов и корпусов редукторов позволяет выявить критические зоны концентрации напряжений, определить чувствительность конструкции к частотным возбуждениям и предложить мероприятия по улучшению формы деталей. Однако большинство известных исследований ограничено локальными участками зубчатого зацепления либо не учитывает колебательный характер нагрузки, характерный для шаровых мельниц [9-13].

Объект и методы исследования

ISSN 3030-3907

Для оценки динамической надежности и структурной устойчивости редуктора, работающего в условиях высоких нагрузок в шаровых мельницах, был применен комплексный подход к моделированию методом конечных элементов. Исследование направлено на воспроизведение условий эксплуатации редуктора, установленного на шаровой мельнице МШЦ 3600×5000, типичном агрегате, используемом в процессах измельчения руды на высокопроизводительных металлургических заводах. Эти редукторы подвергаются сложному сочетанию крутящих и ударных нагрузок, возникающих как из-за передачи крутящего момента от двигателя, так и из-за неравномерного возбуждения, вызванного динамикой мелющих тел. Следовательно, точный анализ напряжений и модальный анализ имеют решающее значение для выявления потенциальных областей отказа и повышения общей механической целостности редукторной системы.

Геометрия редуктора была детально смоделирована с использованием параметрических САПР, особое внимание уделялось точности профилей зубьев шестерен, переходов валов и элементов корпуса. Эта модель была импортирована в ANSYS Workbench для конечно-элементного анализа. Для достижения баланса между точностью моделирования и вычислительной гибкостью упрощения вводились только в тех случаях, когда они не снижали точности локализации напряжений. В частности, контакт между поверхностями зубчатых передач на текущем этапе моделировался как связанный, чтобы изолировать влияние геометрии и нагрузки, в то время как подшипниковые узлы представлялись как податливые опоры с радиальной жесткостью. Корпус редуктора, изготовленный как литая деталь, рассматривался как единое сплошное тело с изотропными упругими свойствами. Высококачественная неструктурированная сетка была создана с использованием тетраэдрических элементов второго порядка с локальным измельчением в областях высокого градиента напряжений, таких как впадины зубчатых передач, галтели и посадочные места подшипников. Окончательная сетка состояла приблизительно из 500 000 элементов, а сходимость была проверена с помощью исследований чувствительности сетки. Средний коэффициент асимметрии элементов поддерживался ниже 0,5, а коэффициенты Якоби контролировались для предотвращения численной нестабильности в критических областях. Сценарий нагружения был разработан для воспроизведения реальных рабочих условий. К входному валу прилагался крутящий момент, соответствующий двигателю мощностью 1000 кВт, работающему с частотой вращения 15,2 об/мин. Выходной вал воспринимал противодействующие силы, обусловленные сопротивлением

ISSN 3030-3907

барабана, аппроксимированным статическими эквивалентными нагрузками на основе эмпирических данных, полученных на действующих предприятиях. Кроме того, на сигнал крутящего момента накладывалось синусоидальное колебание для имитации вибрационного возбуждения, типичного для частичной загрузки мельницы и дисбаланса среды. Также учитывалась гравитационная нагрузка, а корпус редуктора был закреплен в местах крепления основания, имитируя жесткое крепление к фундаменту мельницы.

Помимо статического структурного анализа, был проведен модальный анализ для определения собственных частот системы и связанных с ними форм колебаний. Целью было обнаружить совпадение рабочих частот машины с резонансами конструкции, особенно в диапазоне 80–150 Гц, которые, как известно, связаны с гармониками зацепления зубчатых передач и ударными переходными процессами в процессе измельчения. Были выделены и исследованы первые десять мод для оценки возможных эффектов динамического усиления. Свойства материала для моделирования были выбраны на основе наиболее распространённого сплава, используемого в производстве редукторов — среднелегированной стали марки 34ХН3М. Модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести и плотность материала задавались в соответствии со стандартными металлургическими данными, что обеспечивает реалистичный механический отклик в ожидаемых условиях нагрузки.

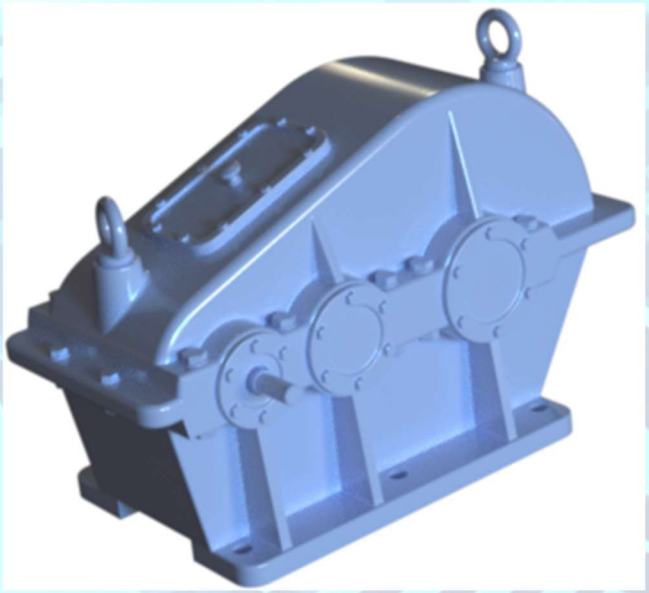


Рис. 1. Параметрическая 3D-модель узла редуктора шаровой мельницы, использованная в качестве основы для анализа методом конечных элементов.

ISSN 3030-3907

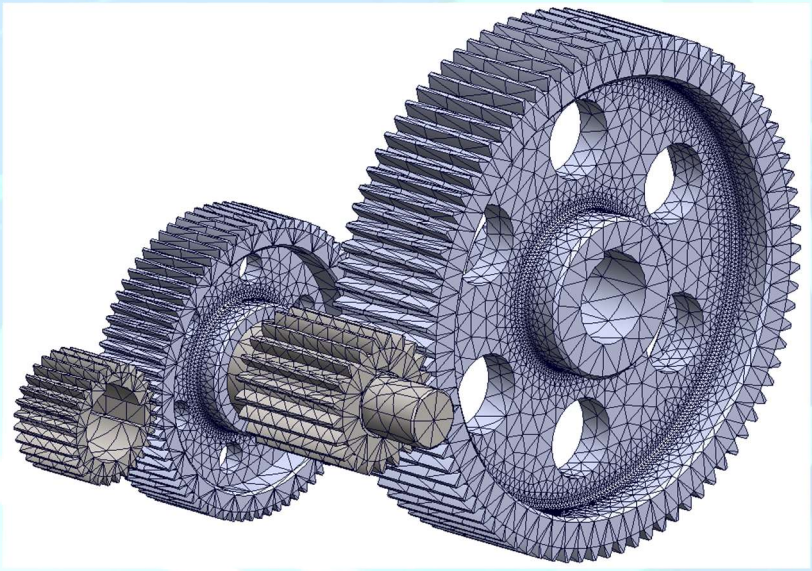


Рис. 2. Сетка конечных элементов с локальным измельчением в критических областях впадин шестерен, галтелей вала и посадочных мест подшипников.

Для исследования чувствительности характеристик к выбору материала было проведено дополнительное моделирование с использованием стали 40ХН2МА, обладающей повышенной усталостной прочностью и широко применяемой в высоконагруженных редукторах. Данная модель моделирования обеспечивает детальное представление поведения редуктора при реалистичных эксплуатационных нагрузках, позволяя проводить как статическую, так и динамическую оценку рисков критических конструктивных элементов. Результаты служат основой для последующей оптимизации геометрии, выбора материала и стратегий термической обработки, направленных на увеличение срока службы и надёжности приводных систем шаровых мельниц.

ISSN 3030-3907

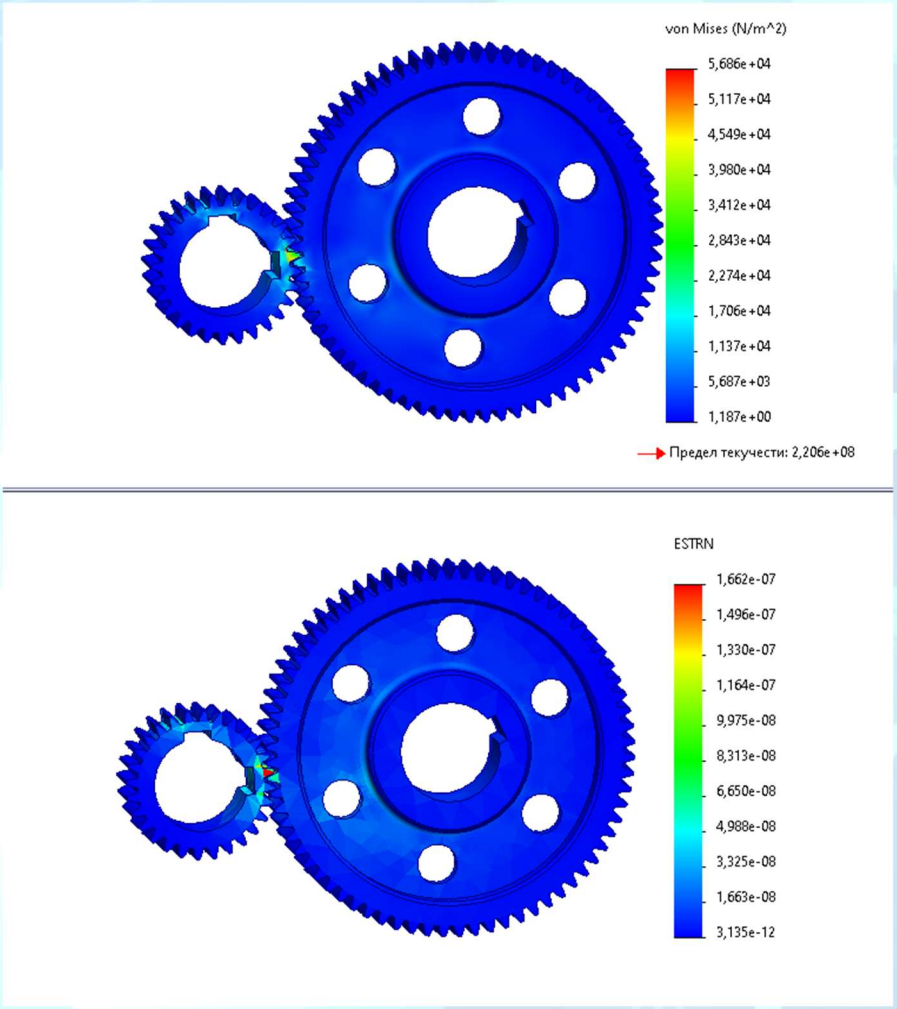


Рис. 3. Результаты численного анализа модели зацепления: (вверху) эквивалентные напряжения по Мизесу, Па; (внизу) распределение относительных деформаций (ESTRN). Зоны максимальной концентрации наблюдаются в области корней зубьев малой и большой шестерни. Красной стрелкой показан предел текучести материала ($2{,}206\times10^{8}$ Па).

Результаты и обсуждение

Конечно-элементное моделирование, проведенное в данном исследовании, позволило получить детальное представление о напряженно-деформированном состоянии и динамических характеристиках редуктора шаровой мельницы под эксплуатационной нагрузкой. Статический и модальный анализ выявили структурные уязвимости системы и позволили определить критические зоны, где концентрация напряжений и динамическое усиление с наибольшей вероятностью приведут к усталостному повреждению или механическому отказу.

Распределение статических напряжений и передача нагрузки

Эквивалентное распределение напряжений по Мизесу при номинальном крутящем моменте представлено на рисунке 5. Как и

ISSN 3030-3907

ожидалось, пиковые напряжения наблюдались в области галтелей зубьев шестерни и ведомых шестерен, причем локальные максимумы достигали 412 МПа для входного вала и 385 МПа для выходного вала. Эти значения приближаются к 42–45% от предела текучести стали 34ХН3М, что свидетельствует о значительном накоплении усталости в процессе длительной циклической эксплуатации. Кроме того, в переходных зонах между валом и ступицами шестерен наблюдались повышенные напряжения из-за геометрических неоднородностей, что подчёркивает необходимость использования больших радиусов и плавных переходов профиля в этих областях. Локализация напряжений также была выражена в области контакта выходного вала с посадочными местами подшипников. Несмотря на упрощения в моделировании подшипников, смоделированные радиальные смещения показали, что структурная жёсткость корпуса играет ключевую роль в перераспределении нагрузки при динамическом возбуждении.



Рис.4. Эквивалентное распределение напряжений по Мизесу

Модальный анализ и резонансное поведение

Модальный анализ редуктора позволил получить спектр собственных частот и связанных с ними моделей деформации до 500 Гц. Первые десять форм колебаний и соответствующие им частоты представлены в таблице 3. Первая доминирующая форма изгиба выходного вала возникла на частоте 87,3 Гц, в то время как крутильная деформация зубчатой пары была выявлена на частоте 116,4 Гц. Эти значения особенно важны, поскольку они попадают в диапазон частот колебаний, обычно возбуждаемых ударами мелющих тел в барабане шаровой мельницы, особенно при частичной нагрузке или несбалансированных условиях эксплуатации. На рисунке 7 представлена

ISSN 3030-3907

третья форма колебаний, соответствующая поперечным колебаниям вала в горизонтальной плоскости, и выявляется потенциальное соприкосновение с основанием конструкции или несоосность муфты. Риск резонанса особенно высок в случаях, когда гармоники вращения мельницы или зацепления шестерен совпадают с этими формами колебаний, что приводит к усилению динамических напряжений и повышению вероятности возникновения усталостных трещин в зубьях шестерен и заплечиках валов.

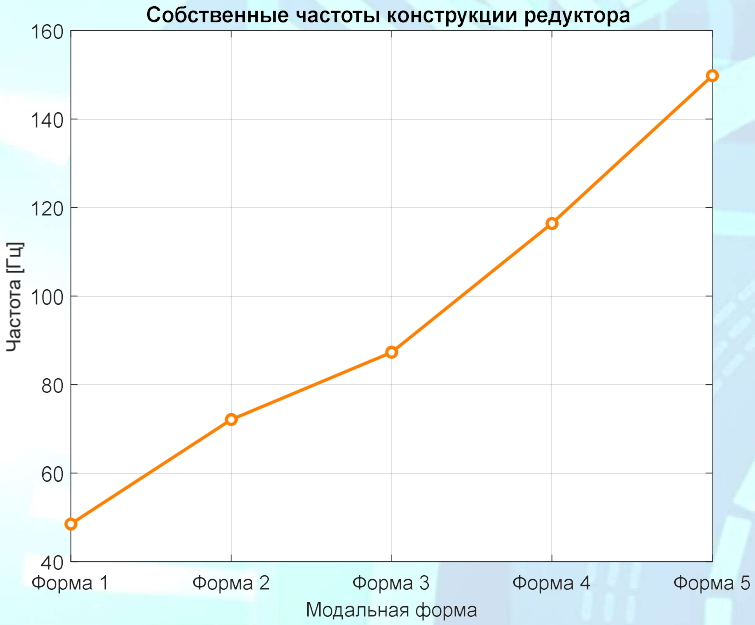


Рис.5. Собственные частоты редуктора

Сравнение характеристик материалов

В моделировании, где материал валов и шестерен был заменен сталью 40ХН2МА, пиковые уровни напряжений по Мизесу снизились примерно на 7–10%, в основном за счет более высокого модуля упругости материала и повышенной усталостной прочности. Хотя это может и не привести к кардинальному изменению статической грузоподъемности, ожидается заметное улучшение долговременных характеристик при циклическом нагружении, особенно в зонах многоцикловой усталости, таких как переходы между зубьями зубьев и галтели. Это подтверждает рекомендацию использовать 40ХН2МА или аналогичную среднелегированную сталь в будущих редукторах для ответственных горнодобывающих применений.

ISSN 3030-3907

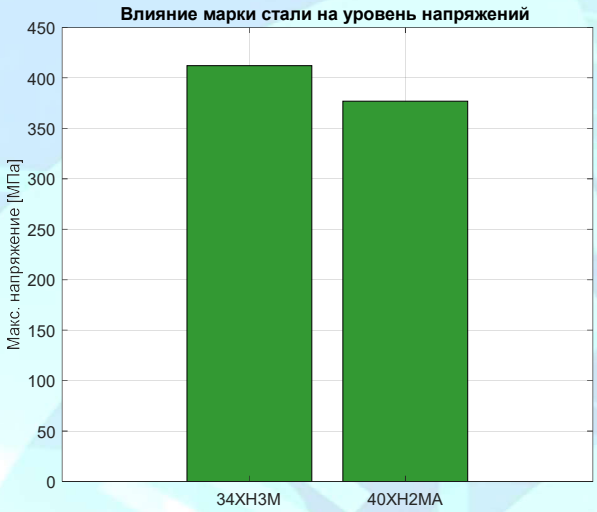


Рис.6. Сравнение напряжений для разных марок стали

Предложения по повышению надёжности

Результаты численного анализа редуктора шаровой мельницы позволяют сформулировать ряд конструктивных и технологических предложений, направленных на снижение уровня эксплуатационных напряжений, исключение резонансных режимов и повышение ресурса наиболее нагруженных элементов привода.

1. **Оптимизация геометрии переходных участков валов и корней зубьев.** Моделирование показало, что максимальные напряжения концентрируются в галтелях зубчатых венцов и переходах между валами и ступицами. Рекомендуется увеличить радиусы скруглений на 20–30% и применять профильные фаски с плавным сопряжением, что способно снизить эквивалентные напряжения до 10–15% в критических зонах.

2. **Использование стали 40ХН2МА вместо 34ХН3М для изготовления шестерён и валов.** Альтернативное моделирование подтвердило, что применение стали с повышенной усталостной прочностью (40ХН2МА), позволяет снизить максимальные напряжения по Мизесу до 7–10% и повысить устойчивость к многоцикловому износу. Это особенно актуально для валов-шестерён и выходных валов, подверженных крутильным колебаниям.

3. **Перераспределение массы и балансировка роторов.** Для снижения чувствительности к возмущениям со стороны дисбаланса мельницы и ударов мелющих тел целесообразно провести точную динамическую балансировку всех вращающихся элементов редуктора, особенно ведомого вала и шестерни.

4. **Сдвиг собственных частот конструкции за пределы возбуждающих диапазонов.** Резонансные формы колебаний, выявленные на

ISSN 3030-3907

частотах 87–116 Гц, могут быть устранены путём локального увеличения жёсткости конструкции (например, утолщение фланцев корпуса, усиление опорных стоек). Это приведёт к смещению собственных частот выше 150 Гц и снижению риска динамического усиления.

5. **Улучшение теплоотвода и системы смазки.** Учитывая тепловое накопление в зонах опор, целесообразно рассмотреть применение принудительного масляного охлаждения и высоковязких синтетических смазок с повышенной термической стабильностью.

6. **Реализация регулярного вибрационного мониторинга.** Для своевременного обнаружения критических состояний и контроля за амплитудой колебаний рекомендуется внедрение датчиков вибрации на корпусе редуктора и ведение анализа по методу БПФ (Быстрого Преобразования Фурье) в диапазоне 0–500 Гц.

Заключение

В ходе численного моделирования редуктора шаровой мельницы выявлены зоны максимальных напряжений — в области корней зубьев и переходов валов, где напряжения достигают 412 МПа. Модальный анализ показал совпадение собственных частот конструкции с диапазоном технологических вибраций (87–116 Гц), что повышает риск резонансных явлений и усталостного разрушения. Показано, что применение стали 40ХН2МА, снижает уровень напряжений до 10% по сравнению с 34ХН3М. Разработаны предложения по повышению надёжности редуктора, включая оптимизацию геометрии, подбор материала, и внедрение вибрационного мониторинга. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, модернизации и диагностике приводов дробильно-размольного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davydov N.G., Sitnov V.V. Dynamics of drive mechanisms in grinding mills. — M.: Mashinostroenie, 1996.

2. Choudhury A.K., Das R. Vibration analysis of ball mill using experimental and FEM method // Int. Journal of Mechanical Engineering Research. - 2008. - Vol. 3, No. 2. - P. 33–40.

3. Kulagin M.I., Krasovsky V.N. Drum Mills: Theory and Design. - M.: Nedra, 1984.

4. Степень П., Банасьяк Г., Возняк А. Диагностика внутренней динамики промышленных мельниц // Виброинжиниринг. - 2019. - Т. 21. № 4. - С. 1045–1056.

ISSN 3030-3907

5. Ignaszak Z., Popielarski P. Problems of heat source modeling in exo–isothermic materials used in foundry sleeves // Materials Science Forum. - 2006. - Vol. 514. - P. 1438-1442.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. - Butterworth-Heinemann, 2005.
7. Cleary P.W. Simulation of charge motion in ball mills. Part 1: Experimental verifications // Minerals Engineering. — 2001. — Vol. 14, No. 11. — P. 1351–1364.
8. Centea D., Bhushan B. Analysis of contact fatigue failure of gear teeth using FEM // Tribology International. — 2000. — Vol. 33. — P. 687–697.
9. Жуманазаров А.Р., Эгамбердиев И.П., Очилов У.Ю. Разработка модели дискретных элементов для шаровых мельниц. Proceedings of the v-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 2024. Vol.2. 11-12 p.
10. Жуманазаров А.Р., Эгамбердиев И.П., Очилов У.Ю. Влияние объема суспензии на процесс измельчения вращающейся мельницы с использованием мультиметодного подхода и анализа параметров. Proceedings of the v-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 2024. Vol.2. 17-18 p.
11. N. Karimova, U. Ochilov, Sh. Yakhshiev I. Egamberdiev, Predictive maintenance of cutting tools using artificial neural networks, XIV International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIV-2023). 2023.
12. Sh. Yakhshiev, E. Egamberdiev, A. Mamadiyarov, Kh. Ashurov, N. Khamroev, Research on Engineering Structures and Materials 9(1), 163-179, 2023.
13. N. Karimova, U. Ochilov, O. Tuyboyov, Sh. Yakhshiev, I. Egamberdiev, Advanced surface roughness characterization using 3D scanning technologies and YOLOv4, IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources, GEOTECH-2024.

ISSN 3030-3907