

Повышение износостойкости конструкций ветрогенераторов за счёт внедрения армированных полимерных материалов со смазочными компонентами

Э.Ю. Абдуллазянов¹, И.Н. Гарькин², Л.С. Сабитов²,
М.А. Закирова³, И.К. Киямов¹

¹Казанский государственный энергетический университет

²Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы

³Московский государственный строительный университет

Аннотация: Проанализированы методы и подходы по снижению износа подшипников и лопастей электрогенераторов, для увеличения срока службы оборудования, повышения его надёжности и эффективности. Приведён анализ воздействующих на износ факторов, включая механические, температурные и эксплуатационные нагрузки. Выполнены расчёты, подтверждающие эффективность применения современных материалов, усовершенствованных систем смазки и оптимизированных технологических режимов. Показано, что комплексная реализация предложенных решений позволяет существенно уменьшить темпы износа, снизить затраты на обслуживание и ремонт, а также обеспечить стабильную производительность генераторов. Представленные рекомендации могут служить основой для модернизации существующего оборудования и проектирования новых энергоустановок.

Ключевые слова: износ, подшипники, лопасти, электрогенератор, надёжность, долговечность, эксплуатация, обслуживание, материалы, системы смазки, оптимизация, расчёты

Разработка инновационных материалов для элементов машин и механизмов в электроэнергетике, в частности, для ветрогенераторных установок, представляет собой важную научно-техническую задачу. Одной из основных проблем, ограничивающих срок эксплуатации и надёжность ветрогенераторов, является износ подшипниковых узлов — зачастую наиболее нагруженных, труднодоступных и критичных для работы колесных агрегатов элементов. Современная тенденция внедрения композитных полимерных материалов с армирующими и смазывающими добавками позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики таких конструктивных компонентов [1,2].

Ветрогенераторы работают в сложных климатических условиях, часто с ограниченным доступом для технического обслуживания и ремонта.

Подшипники, сепараторы и другие элементы узлов трения испытывают комбинированное воздействие механических, термических и атмосферных нагрузок. Применение традиционных пластиков (например, полиамида-6) заметно ограничено их сравнительно низкой износостойкостью при повышенных нагрузках. Поэтому вопросы совершенствования химического состава и архитектуры материала выходят на передний план [3].

Рассмотрим сепаратор подшипника скольжения как пример критической детали ветрогенератора. В качестве материалов для сравнительного анализа взяты:

Полиамид-6 (РА6) без дополнительных модификаций.

Композиционный материал на основе РА6, армированный 20% стекловолокна и модифицированный 10% порошка политетрафторэтилена (PTFE).

Основные исходные параметры задачи.

Рабочее давление на контактирующие элементы составляет:

$p=4 \text{ МПа (4 000 000 Па)}$.

Скорость скольжения в режиме эксплуатации $v=0,3 \text{ м/с}$, время работы на период наблюдения 10 000 часов. Ожидаемая площадь контакта оценивается как $A=0,001 \text{ м}^2$.

Для конструкционных пластиков используется эмпирическая формула Архарда:

$$K = \frac{V}{F * S}$$

где K — коэффициент износа [$\text{м}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$], V — объём износа, F — нормальная сила, S — путь трения. В инженерных расчётах используют выражение глубины износа:

$$h=K*p*v*t$$

Экспериментальные данные для выбранных материалов, согласно профильным работам, составляют:

$$\text{РА6: } K=1 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\cdot\text{м}) = 1 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$$

$$\text{РА6} + 20\% \text{ GF} + 10\% \text{ PTFE: } K=2 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м}) = 2 \times 10^{-12} \text{ м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$$

Общие значения силы:

$$F=p \times A=4\,000\,000 \times 0,001=4\,000 \text{ Н}$$

Путь трения за период эксплуатации:

$$S=v \times t \times 3600=0,3 \times 10\,000 \times 3600=10\,800\,000 \text{ м}$$

Рассчитаем объём износа для каждого материала:

РА6 (неармированный):

$$V=K \times F \times S=1 \times 10^{-11} \times 4\,000 \times 10\,800\,000=0,432 \text{ м}^3$$

РА6 + GF + PTFE:

$$V=2 \times 10^{-12} \times 4000 \times 10\,800\,000=0,0864 \text{ м}^3$$

Глубина износа (для контакта площадью $0,001 \text{ м}^2$):

РА6:

$$h = \frac{0,432}{0,001} = 432 \text{ мм}$$

РА6 + GF + PTFE:

$$h = \frac{0,0864}{0,001} = 86,4 \text{ мм}$$

Реальное техническое разрушение детали наступит значительно раньше достигаемых глубин, но разница в износостойкости между материалами сохраняет свой характер.

Введение армирующих (стекловолокну) и смазочных (PTFE) компонентов в состав полиамида позволяет снизить коэффициент износа детали в 5 и более раз. Это достигается за счет повышения прочности композита (стекловолокну способствует перераспределению нагрузок и препятствует развитию трещин) и снижения трения (PTFE формирует на

поверхности самосмазывающийся слой, уменьшая энергию разрушения и отрыв молекул при скольжении) [4]. В результате срок службы сепаратора увеличивается пропорционально сокращению износа, а соответственно, значительно уменьшается частота плановых замен и неконтролируемых простоев узлов ветрогенератора.

Длительный срок службы деталей, выполненных из современных композитов, вместе с низкой необходимостью обслуживания особенно важны для объектов с труднодоступным расположением (ветроэлектростанции, высокомачтовые установки). Это приводит к увеличению коэффициента готовности оборудования, снижению затрат на сервис, снижению риска аварийных остановов и, в итоге, к увеличению экономической рентабельности электростанций [5].

Инженерно-математическое моделирование позволяет подобрать оптимальную геометрию детали (например, увеличить толщину или изменить профиль сечения), скорректировать состав композита путем включения дополнительных наполнителей (графит, молибденит), учесть специфические условия эксплуатации (температуру, влажность, динамические нагрузки) [6,7]. Выполнение комплексных трибологических и ресурсных испытаний в лабораторных и реальных условиях дополнительно повышает достоверность прогнозирования ресурса.

Для подшипниковых и других высоконагруженных деталей ветрогенераторов рекомендуется переход на композиты, содержащие армирующую фазу и смазочные компоненты, в частности:

- армирование стекловолокном (10–30% по массе);
- включение политетрафторэтилена или графита (5–15% по массе);
- оптимизация внутренней структуры, включая ориентацию волокон и степень наполнения.

Следующим шагом для повышения износостойкости конструкций ветрогенераторов, является снижения износа их лопастей.

Для этого, рассмотрим способ нанесения на рабочую поверхность защитных покрытий на основе полиамида, модифицированного наполнителями (например, углеродными или керамическими наночастицами). Такой подход позволяет увеличить твёрдость поверхности, повысить стойкость к абразивному и эрозионному износу и снизить трение [8,9].

В качестве примера приведём расчет экономической эффективности использования защитных покрытий с наномодифицированным полиамидом (рис.1,2) по сравнению с исходным материалом лопасти (стеклопластик на эпоксидной матрице; рис.3).



Рис.1 Наномодифицированный полиамидом (изображение под микроскопом; фото авторов)

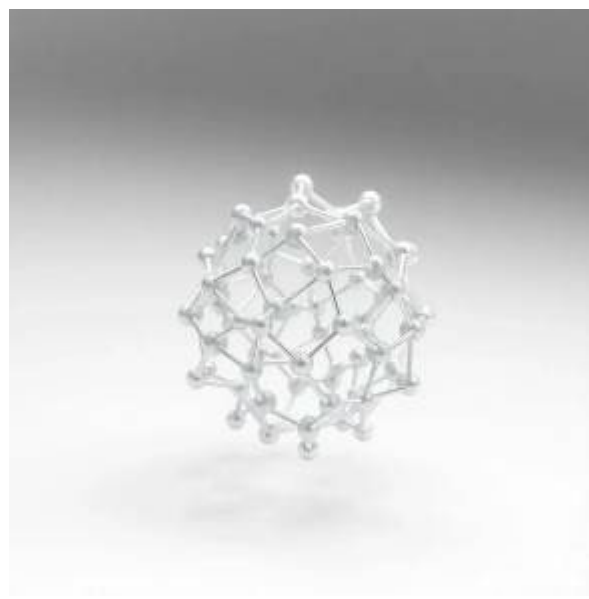


Рис.2 Нано модифицированный полиамидом (компьютерная модель; выполненная авторами)

Исходные данные:

Площадь покрытия лопасти: 30 м²

Толщина слоя покрытия: 0,5 мм

Плотность покрывающего материала: 1,3 г/см³

Цена покрытия: 1800 руб./кг

Средний рабочий ресурс стандартной лопасти до ремонта без покрытия: 8 лет

При применении покрытия износ (толщина изношенного слоя) уменьшается в 3 раза, срок службы до первого ремонта увеличивается до 16 лет

Стоимость замены лопасти — 600 000 руб.

Расчёт необходимого количества покрытия:

Объём: $V = 30 \text{ м}^2 \times 0,0005 \text{ м} = 0,015 \text{ м}^3 = 15 \text{ литров} = 15\,000 \text{ см}^3$

Масса: $m = 15\,000 \text{ см}^3 \times 1,3 \text{ г/см}^3 = 19\,500 \text{ г} = 19,5 \text{ кг}$

Расчёт стоимости покрытия:

Стоимость: $19,5 \text{ кг} \times 1800 \text{ руб./кг} = 35\,100 \text{ руб.}$

Экономический эффект за 16 лет эксплуатации на одну лопасть:

Без покрытия за 16 лет понадобится ДВА ремонта (каждые 8 лет):

Затраты = $2 \times 600\,000 = 1\,200\,000 \text{ руб.}$

С покрытием за 16 лет — только ОДИН ремонт:

Затраты = $1 \times 600\,000 + 35\,100 = 635\,100 \text{ руб.}$

Экономия:

$\Delta = 1\,200\,000 - 635\,100 = 564\,900 \text{ руб.}$

Таким образом, применение модифицированного полиамидного покрытия позволяет почти в два раза сократить эксплуатационные затраты, связанных с ремонтом и заменой лопастей, а увеличение срока службы до первого ремонта — до 16 лет — значительно повышает надёжность и эффективность ветроустановки.

Снижение износа достигается за счёт увеличения твёрдости и прочности верхнего слоя лопасти, снижения коэффициента трения и уменьшения эрозионных потерь в зоне наибольшего контакта с потоками воздуха и атмосферными частицами [10,11].



Рис.3 Нанесение модифицированной смазки на лопасть ветрогенератора
(изображение смоделировано авторами)

В заключение, внедрение подобных покрытий — это не только способ повышения долговечности оборудования, но и возможность значительной экономии эксплуатационных издержек ветроэнергетических предприятий [12].

Снижение износа подшипников и лопастей электрогенераторов имеет ключевое значение для повышения эффективности и надёжности всей энергетической установки. Подшипники и лопасти подвергаются интенсивным механическим и климатическим нагрузкам, и их преждевременное изнашивание может привести к внеплановым остановкам,

дорогостоящему ремонту и сокращению срока службы оборудования. Повышенная износостойкость этих элементов существенно снижает эксплуатационные затраты, позволяет поддерживать стабильную производительность генератора и минимизирует риск аварийных ситуаций. Кроме того, долговечность основных узлов способствует увеличению общей рентабельности электрогенераторов и делает энергетику более устойчивой и экологически безопасной. Таким образом, системная работа по снижению износа подшипников и лопастей — важнейший аспект для эффективной, надёжной и долгосрочной эксплуатации электрогенерационного оборудования.

Литература:

1. Гусев Н.И., Кочеткова М.В., Паршина К.С. Прочность сцепления пенополимерцементных растворов с пенобетонными наружными стенами отапливаемых зданий // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 4. С. 52-56
2. Ведяков И.И., Гукова М.И., Фарфель М.И., Кондрашов Д.В., Яровой С.Н. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО "Тагмет" // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 1 (246). С. 58-64.
3. Кочеткова М.В., Гусев Н.И., Снежкина О.В., Паршина К.С. Экспериментальная оценка работы ростверков // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 1. С. 77-81
4. Гучкин И.С., Булавенко В.О. Усиление железобетонной балки стальной затяжкой, накладками и фиброармированным пластиком // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 69-74
5. Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Арискин М.В. Научно-техническое сопровождение работ по усилению строительных конструкций монолитного

многоэтажного жилого дома // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 3 (56). С. 122-127.

6. Кузин Н.Я., Багдоев С.Г. Оценка внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий // Региональная архитектура и строительство. 2012. №2. С.79-82.

7. Снегирева А.И., Мурашкин В.Г. К вопросу обследования строительных конструкций, зданий и сооружений // Эксперт: теория и практика. 2021. №6 (15). С. 45-51.

8. Шеина С. Г., Виноградова Е.В., Денисенко Ю.С. Пример применения BIM технологий при обследовании зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037

9. Garkin I.N., Garkina I.A. System approach to technical expertise construction of building and facilities // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. Vol.8. №5. pp.213-217.

10. Петрова И.Ю., Мостовой О.О. Обзор процесса проведения обследований зданий и сооружений. Проблемы и пути их решения. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. 2013. № 1 (36). С. 12-20.

11. Евсеев А.Е., Гарькин И.Н., Абдуллазянов Э.Ю. Использование дифференциальных уравнений движения тела при определении параметров виброзащиты // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 4 (50). С. 127-131.

12. Королев Е.В. Техничко-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование //Строительные материалы. 2017. № 3. С. 85-89.

References

1. Gusev N.I., Kochetkova M.V., Parshina K.S. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2014. № 4. p. 52-56
2. Vedjakov I.I., Gukova M.I., Farfel' M.I., Kondrashov D.V., Jarovoj S.N. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 2013. № 1 (246). pp. 58-64.
3. Kochetkova M.V., Gusev N.I., Snezhkina O.V., Parshina K.S. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2014. № 1. pp. 77-81.
4. Guchkin I.S., Bulavenko V.O. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2012. № 1. pp. 69-74.
5. Sadenko D.S., Gar'kin I.N., Ariskin M.V. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2023. № 3 (56). pp. 122-127.
6. Kuzin N.Ja., Bagdov S.G. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2012. №2. pp.79-82.
7. Snegireva A.I., Murashkin V.G. Jekspert: teorija i praktika. 2021. №6 (15). pp. 45-51.
8. Sheina S. G., Vinogradova E.V., Denisenko Ju.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037
9. Garkin I.N., Garkina I.A. System approach to technical expertise construction of building and facilities Contemporary Engineering Sciences. – 2015. Vol.8. №5. pp.213-217.
10. Petrova I.Ju., Mostovoj O.O. Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija: nauchno-tehnicheskij zhurnal. 2013. № 1 (36). pp. 12-20.
11. Evseev A.E., Gar'kin I.N., Abdullazjanov Je.Ju. Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija. 2024. № 4 (50). pp. 127-131.
12. Korolev E.V. Stroitel'nye materialy. 2017. № 3. pp. 85-89.

Дата поступления: 12.05.2025

Дата публикации: 25.06.2025