

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-4-99-107

УДК 620.1

С. С. СЕРГЕЕВ, канд. техн. наук, доц.

А. Д. ПОПЕЛЕВ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СЛОЖНОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ ПОДШИПНИКОВ ТУРБИН И ГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Аннотация

Экспериментально проверена разработанная на Белорусской АЭС технология комплексного неразрушающего контроля сложногогеометрических объектов на примере антифрикционного баббитового покрытия подшипников турбин и генераторов АЭС и показана ее эффективность для выявления прогнозируемых недопустимых несплошностей. Выявлены отдельные недостатки технологии, снижающие достоверность контроля, и приведены рекомендации по их устранению.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, капиллярный контроль, визуальный и измерительный контроль, антифрикционное баббитовое покрытие.

Для цитирования:

Сергеев, С. С. Неразрушающий контроль сложногогеометрических изделий на примере подшипников турбин и генераторов АЭС / С. С. Сергеев, А. Д. Попелев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 4 (89). – С. 99–107.

Введение

Производство ядерной энергии продолжает оставаться достаточно привлекательным и надежным решением, обеспечивающим безуглеродную электроэнергию во всем мире. Но с большой мощностью приходит и большая ответственность за безопасную работу посредством тщательного технического обслуживания и проверок.

Промышленные предприятия, работающие в области атомной энергетики, требуют особого подхода в отношении технической диагностики состояния оборудования, т. к. они являются объектами повышенной опасности. На предприятиях подобного рода используют высокотехнологичное оборудование,

техническое состояние которого должно быть пригодным и безопасным для эксплуатации.

Освоение новых технологий, как и совершенствование старых, требует от ученых и инженеров создание все более сложных (как геометрически, так и технологически) узлов машин и оборудования. Для достижения этих целей применяются новые материалы и сплавы, сложногогеометрические конструкции и изделия, требующие все более совершенных технологий и методик контроля, которые обеспечивали бы их долговечную и безопасную эксплуатацию.

В статье на примере антифрикционного баббитового покрытия подшипников турбин и генераторов АЭС представлены эффективные методы и спосо-

бы контроля геометрически сложных объектов из неоднородных материалов.

Описание объекта исследования

Подшипники скольжения в процессе эксплуатации подвергаются воздействию постоянных и переменных по модулю и направлению нагрузок. Антифрикционное покрытие на поверхно-

сти подшипников скольжения турбин и генераторов служит для равномерного распределения нагрузки от вращающегося вала на подшипник, что, в свою очередь, позволяет ему выдерживать большие нагрузки.

В большинстве случаев для подшипников турбин и генераторов применяют баббит марки Б-83, состав которого приведен в табл. 1.

Табл. 1. Химический состав баббита Б-83

Основные компоненты	Олово	Основа
	Сурьма	10 %...12 %
	Медь	5,5 %...6,5 %
Примеси	Железо	0,1 %
	Мышьяк	0,05 %
	Цинк	0,004 %
	Свинец	0,35 %
	Висмут	0,05 %
	Алюминий	0,005 %

Нанесение антифрикционного покрытия осуществляется путем заливки расплавленного баббита на рабочую поверхность подшипника. В качестве основного материала при изготовлении тела подшипника применяют коррозионно-стойкие стали и чугуны. Эскиз исследуемого объекта приведен на рис. 1. Для лучшего качества заливки покрытия и хорошего сцепления баббит на подшипник заливается в разделку типа «ласточкин хвост» (рис. 2), при этом толщина баббитового покрытия варьируется от 6 до 10 мм в зоне гладкой основы и 8...15 мм в зоне разделки.

Анализ существующих методов и способов контроля с учетом опыта эксплуатации зарубежных стран. Анализ возможных дефектов сцепления

К сожалению, на сегодняшний день

не существует единого унифицированного неразрушающего метода определения прочности сцепления антифрикционного слоя со стальной основой.

Поэтому в современном машиностроении есть несколько технологий оценки дефектов контактных поверхностей. Они фиксируют следы эксплуатации – трещины, царапины, сколы и другие следы усталостных деформаций. Своевременная фиксация таких проявлений помогает предупредить разрушение подшипника и увеличить срок его службы.

Нормативными документами, разработанными АО «Концерн Росэнергоатом», рекомендуются следующие основные методы контроля элементов турбин и иного оборудования, где применяется заливка антифрикционного слоя: капиллярный контроль, ультразвуковой контроль.

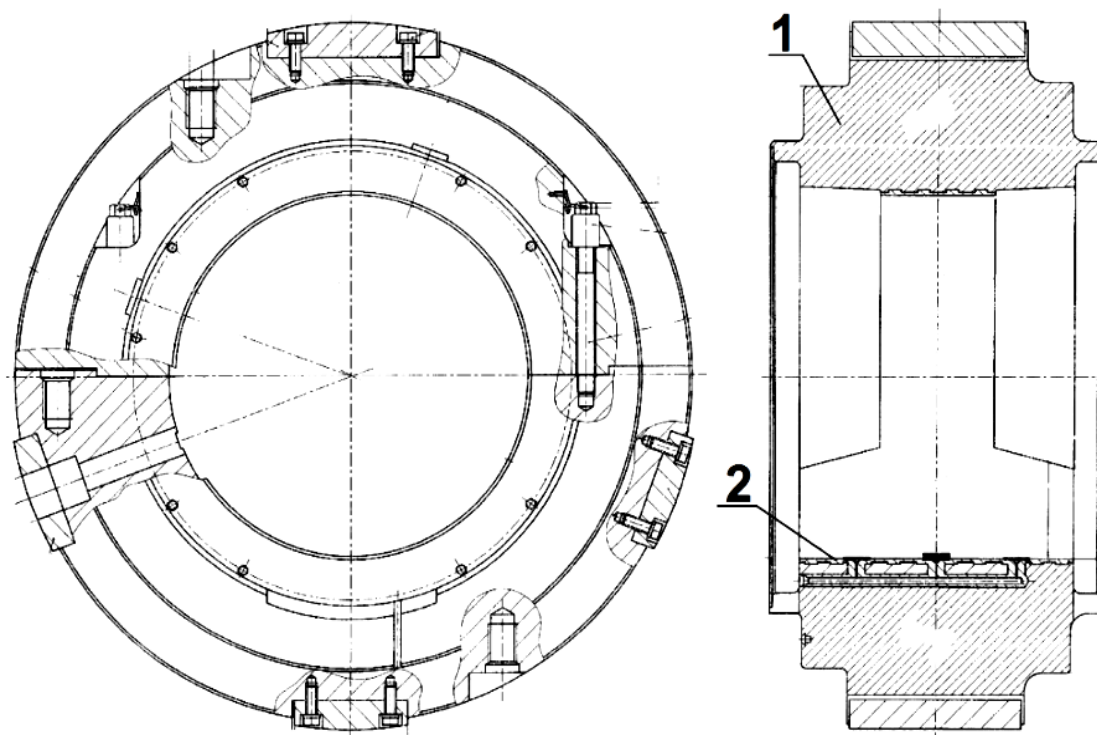


Рис. 1. Эскиз объекта исследования: 1 – стальная основа; 2 – баббитовое покрытие

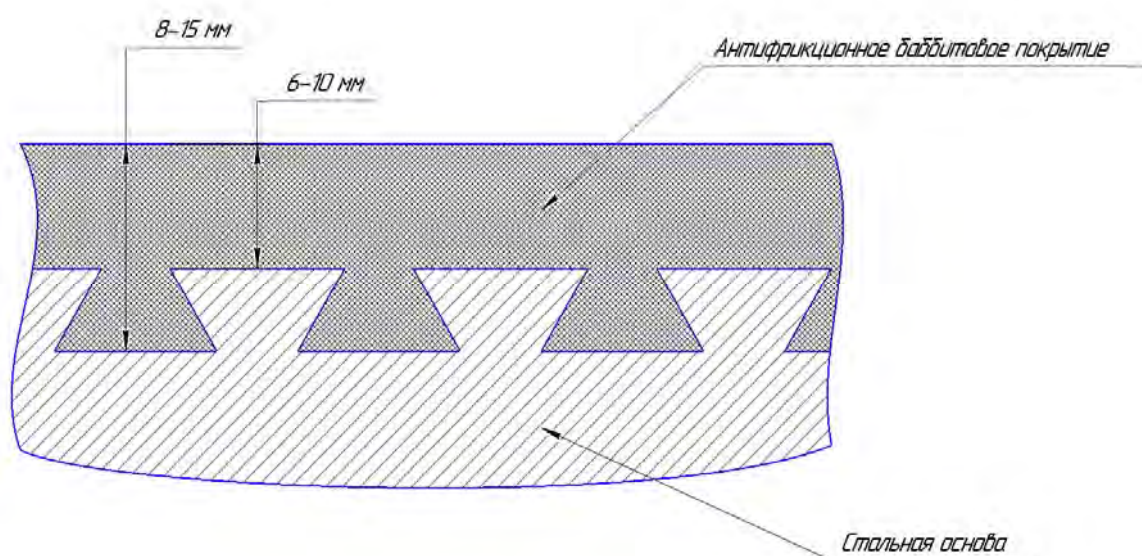


Рис. 2. Вид и форма разделки типа «ласточкин хвост»

Основными прогнозируемыми типами дефектов, существенно влияющими на работоспособность подшипников, являются:

– отслоение в теле покрытия и зонах лунок гидроподъема, маслоподъема,

залитой на гладкую основу и в расточку типа «ласточкин хвост»;

– отслоение покрытия по торцам и на поверхности горизонтального разреза;

– трещины, задиры, забоины, скопления пор;

– электрокоррозионные и коррозионные разрушения.

Опыт Белорусской АЭС по эксплуатации оборудования с антифрикционным покрытием показал, что данные методики пусть и являются эффективными, однако не всегда позволяют выявлять все указанные выше дефекты. Поэтому специалистами Белорусской АЭС ведутся поиски новых способов контроля и модернизации уже имеющихся.

Были проанализированы следующие методы и способы контроля:

– все магнитные и вихрековые методы и способы не являются эффективными в связи со сложной структурой объекта исследования;

– радиографические методы являются неподходящими в связи с низкой эффективностью контроля, а также сложностью в реализации и возможной опасностью для персонала;

– ультразвуковой контроль (УЗК) с применением наклонных преобразователей невозможен в связи с конструктивной особенностью объекта.

Выявлены наиболее приемлемые методы и способы контроля, а именно:

– визуальный и измерительный контроль (ВИК) поверхности покрытия и торцевых поверхностей;

– капиллярный метод контроля (КК) торцевых поверхностей и поверхностей горизонтального разъема;

– ультразвуковой контроль с применением прямых преобразователей.

С учетом опыта эксплуатации на Белорусской АЭС модернизируются и нормы оценки качества. Так, в отличие от норм, описанных в ГОСТ Р ИСО 4386-1–94 *Неразрушающие ультразвуковые испытания соединения слоя подшипников материала и основы*, в СТО 1.1.1.003.0043 *Неразрушающий контроль баббитового покрытия со стальной основой подшипников турбин К-1200-6,8/50 и генераторов атомной электростанции* (далее – СТО) Бело-

русской АЭС ужесточаются нормы по размерности выявляемых отслоений и их месторасположению. В СТО это формулируется следующим образом: «Не допускаются отслоения (как точечное, так и сплошное) в зоне лунок гидроподъема и участков шириной 20 мм, прилегающих к торцам, плоскостям разъема и зонам лунок гидроподъема». Таким образом, исключается возможность отрыва покрытия в наиболее опасных местах подшипника.

Применяемые средства и материалы для неразрушающего контроля

Для проверки эффективности выбранных методик проведены экспериментальные исследования. При этом использовали следующие технические средства и дефектоскопические материалы.

Комплект для проведения ВИК состоит из линеек металлических 150 и 300 мм, рулетки измерительной 5 м, штангенциркуля ШЦЦ-1-125 0,01 мм.

При проведении КК выбрали дефектоскопический набор Sherwin для 2-го класса чувствительности по ГОСТ Р 50.05.09–2018 (рис. 3).

Для реализации УЗК использовали ультразвуковой дефектоскоп USM-36 (рис. 4). При проведении УЗК допускается применять совмещенные или раздельно-совмещенные прямые ПЭП. Схемы контроля разными типами ПЭП приведены на рис. 5. Типы ПЭП подбираются исходя из толщины покрытия в соответствии с табл. 2. Для контроля выбрали комплектный раздельно-совмещенный преобразователь DA501-EN с частотой 5 МГц.

Для настройки ультразвукового оборудования использовали специальный настроечный образец, разработанный на Белорусской АЭС (рис. 6), верхняя часть которого выполнена из аналогичного баббитового слоя, а нижняя часть соответствует материалу стальной основы. Дополнительные принадлежно-

сти: контактная жидкость на основе глицерина, ветошь, маркеры по металлу

(белый, черный), ультрафиолетовый осветитель.



Рис. 3. Набор дефектоскопических материалов Sherwin для проведения КК



Рис. 4. Дефектоскоп ультразвуковой USM-36

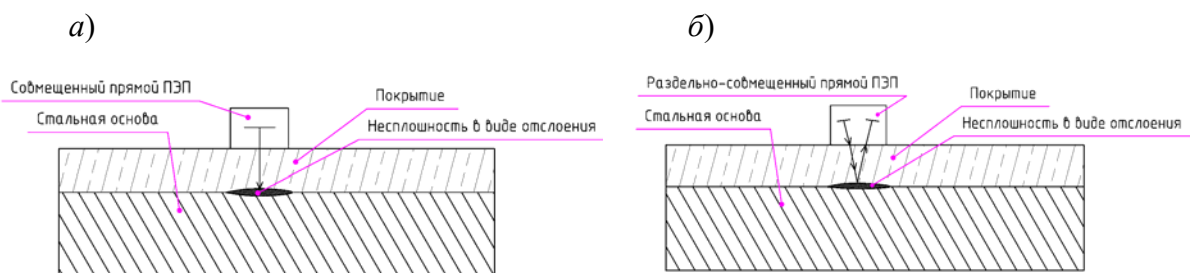


Рис. 5. Схема контроля совмещенным (а) и раздельно-совмещенным (б) ПЭП

Приборостроение

Табл. 2. Типы и параметры ПЭП в зависимости от толщины покрытия

Место ввода УЗ-волны	Толщина покрытия, мм	Тип прямого ПЭП	Частота ПЭП, МГц	Диаметр контактной поверхности ПЭП, мм
Со стороны покрытия	От 1,5 до 3,0	РС	10,0	6 и более
	Св. 3,0 до 20,0	РС	2,5...6,0	
	Св. 3,0 до 20,0	С	4,0...6,0	

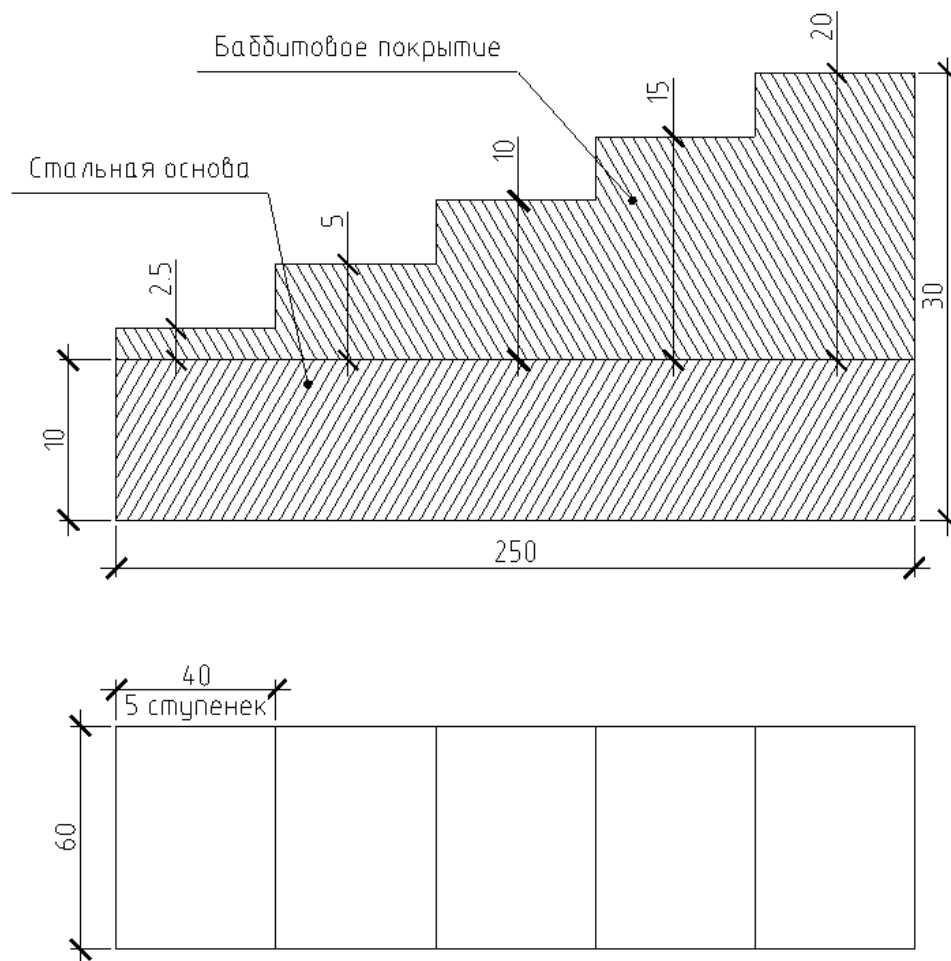


Рис. 6. Настроечный образец для ультразвукового контроля

Исследования на реальном образце

В качестве объекта исследования был выбран опытный образец подшипника скольжения турбины К-1200-6,8/50. Перед проведением контроля произвели подготовку объекта к контролю. Поверхность контроля должна быть чистой, без остатков смазочной жидкости. В соответ-

ствии с требованиями СТО, а также методик ГОСТ Р 50.05.08, ГОСТ Р 50.05.09, ГОСТ Р 50.05.02 общая шероховатость поверхности для комплексного контроля должна быть не хуже $R_z 20$ мкм. Для проверки шероховатости применялись образцы шероховатости (сравнения). Проведение контроля осуществлялось при температуре окружающей сре-

ды 21 °С и влажности 54 %.

По результатам ВИК выявлены подозрительные места на верхней половине вкладыша. На нижней половине несплошности не были обнаружены.

Проведен КК торцевых поверхностей, поверхностей горизонтального разреза, а также мест, вызвавших подозрения при проведении ВИК.

В результате КК были выявлены:

– скопления микронесплошностей

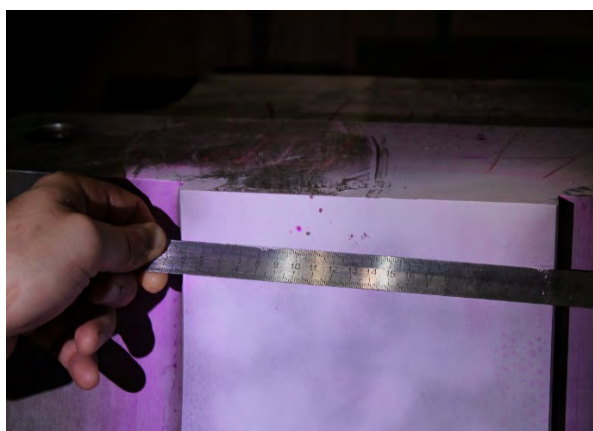
на поверхности верхней половины вкладыша (рис. 7, а);

– разветвленная трещина на верхней половине вкладыша (рис. 7, б);

– отслоение в плоскости горизонтального разреза верхней половины вкладыша (рис. 7, в);

– царапины на нижней половине вкладыша (рис. 7, г).

а)



б)



в)



г)

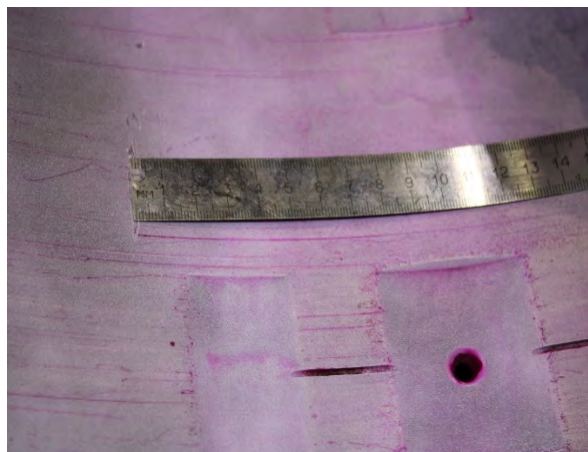


Рис. 7. Результаты капиллярного контроля подшипника

Проведен УЗК на наличие отслоений. Результат контроля:

– отслоение покрытия размером 38 × 34 мм на нижней половине вкладыша;

– отслоение покрытия размером 185 × 110 мм на нижней половине вкладыша;

– отслоение покрытия размером 33 × 17 мм на нижней половине вкла-

Приборостроение

дыша;

– отслоение покрытия диаметром 8 мм на нижней половине вкладыша.

Результаты УЗК показаны на де-

фектограмме контроля (рис. 8). На верхней половине вкладыша несплошности не были обнаружены.

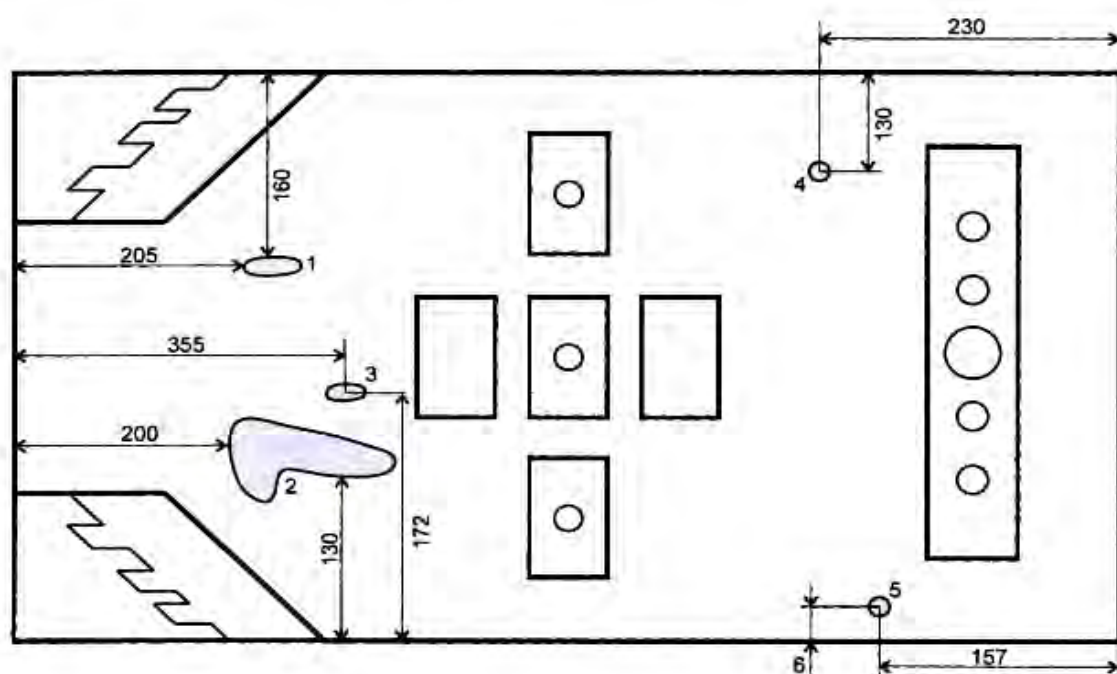


Рис. 8. Дефектограмма по результатам УЗК подшипника

По результатам проведенного контроля и оценки качества вкладыш подшипника признан негодным.

Закключение

Экспериментальное исследование реального образца подшипника скольжения турбины К-1200-6,8/50 подтверждает эффективность разработанной Белорусской АЭС комплексной технологии контроля. Результативность выявления на ранних стадиях таких дефектов как отслоения покрытия, трещины и скопления микронесплошностей являются основным показателем эффективности предложенных методов и способов неразрушающего контроля.

Однако при всех очевидных положительных результатах предложенной технологии контроля выявлены отдель-

ные недостатки, которые необходимо устранить на стадии дальнейшего ее совершенствования.

Одной из проблем является невозможность контроля сплошности соединения в зоне паза «ласточкин хвост». Для решения данного вопроса требуется разработка специальных средств и методик контроля этих участков, поскольку предсказать влияние отслоения в этих зонах на дальнейшую работу подшипника, в особенности нижней половины, на которую приходится основная нагрузка, практически невозможно.

При проведении визуального исследования покрытия оценить трещины и отслоения, у которых раскрытие составляет от 1 до 10 мкм, практически невозможно, что вынуждает дополнительно перепроверять данные участки капиллярными методами, хотя капил-

лярному контролю, в соответствии с узаконенной методикой, должны подвергаться только торцевые поверхности и поверхности горизонтального разъема. Для повышения достоверности рекомендуется подвергать капиллярному контролю всю поверхность покрытия.

Разработанная и проверенная ме-

тодика контроля позволит прогнозировать надежность и ресурс оборудования, своевременно выполнить ремонт или замену отдельных элементов механизмов и конструкций и продлить ресурс объекта контроля как минимум до очередного капитального ремонта или обследования.

Статья сдана в редакцию 10 сентября 2025 года

Контакты:

sss.bru@tut.by (Сергеев Сергей Сергеевич);

poplev92@mail.ru (Попелев Алексей Дмитриевич).

S. S. SERGEEV, A. D. POPELEV

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF COMPLEX GEOMETRIC PRODUCTS AS EXEMPLIFIED BY NPP TURBINE BEARINGS AND GENERATORS

Abstract

The technology for complex non-destructive testing of complex geometric objects developed at the Belarusian Nuclear Power Plant (BNPP) was experimentally tested using the antifriction babbitt coating of NPP turbine bearings and generators as an example. Its effectiveness in detecting predictable unacceptable discontinuities is shown. Some shortcomings of the technology that reduce testing reliability were revealed, and recommendations for their elimination are given.

Keywords:

non-destructive testing, ultrasonic testing, capillary testing, visual and measuring testing, anti-friction babbitt coating.

For citation:

Sergeev, S. S. Non-destructive testing of complex geometric products as exemplified by NPP turbine bearings and generators / S. S. Sergeev, A. D. Popelev // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 4 (89). – P. 99–107.