

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ ЦАПФ СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ КАРТОНО- И БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПО УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ИХ МАТЕРИАЛА

© 2023 г. И.А. Растегаев^{1,*}, А.К. Хрусталеv¹, А.В. Дanyuk¹, М.А. Афанасьеv¹,
Д.Л. Мерсон¹, Д.В. Севастьянов², С.В. Мелентьеv², А.Д. Плюснин³

¹Тольяттинский государственный университет, Россия 445020 Тольятти, ул. Белорусская, 14

²Филиал АО «Группа «ИЛИМ», Россия 165651 Коряжма, ул. Дыбцына, 42

³ООО «Прикамский картон», Россия 614037 Пермь, ул. Бумажников, 1

E-mail: *RastlgAev@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.06.2023; после доработки 18.07.2023

Принята к публикации 21.07.2023

На примере оценки технического состояния цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин (КДМ) обсуждается вопрос возможности ранжирования циклически нагруженных элементов динамического оборудования по степени поврежденности их материала усталостными трещинами с применением данных акустико-эмиссионных (АЭ) измерений. В результате специальных лабораторных исследований с варьированием нагрузки в цикле нагружения и смазывания берегов трещины установлены особенности АЭ от трения берегов трещины и пластической деформации в вершине трещины при ее росте в вязком материале. Показано, что при циклическом нагружении материала сигналы АЭ от трения ее берегов обнаруживаются более устойчиво, чем сигналы АЭ от скачка трещины при приращении ее длины, и что отслеживание первых обеспечивает обнаружение усталостной поврежденности материала даже в условиях нагружения, недостаточных для прироста трещин. На основании полученных данных разработаны три признака АЭ наличия усталостной поврежденности материала элементов динамического оборудования при условии циклической активации движения берегов трещины. В результате промышленной апробации разработанных признаков АЭ подтверждена их работоспособность и уточнены их граничные значения на эксплуатирующихся цапфах сушильных цилиндров КДМ, а также предложена методика ранжирования цапф по уровню поврежденности усталостными трещинами. Путем сопоставления результатов измерений АЭ с ультразвуковым контролем оценена достоверность предложенного подхода, которая показала вероятность обнаружения усталостной трещины в цапфах сушильных цилиндров КДМ на уровне 71 %, при вероятности их пропуска и перебраковки изделия 12 и 17 % соответственно. Разработанная методика переносима и на другое массивное динамическое оборудование после уточнения граничных значений признаков АЭ усталостной поврежденности материала на данном типе объекта.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, усталость металла, третинообразование, цапфа сушильных цилиндров, картоноделательная машина, диагностирование.

APPLICATION OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR RANKING BY FATIGUE DAMAGE OF THE MATERIAL OF TRUNNIONS OF DRYING CYLINDERS OF CARDBOARD AND PAPER-MAKING MACHINES

© 2023 I.A. Rastegaev^{1,*}, A.K. Khrustalev¹, A.V. Danyuk¹, M.A. Afanas'yev¹, D.L. Merson¹,
D.V. Sevast'yanov², S.V. Melent'ev², A.D. Plyusnin³

¹Togliatti State University, st. Belorusskaya, 14, Toliatti, 445020 Russia

²The Koryazhma branch of Ilim Group, st. Dybtsyna, 42, Koryazhma, 165651 Russia

³LLC «Prikamsky cardboard», st. Wallets, 1, Perm, 614037, Russia

E-mail: *RastlgAev@yandex.ru

Using the example of assessing the technical condition of the trunnions of drying cylinders of cardboard-making machines (CDM), the question of the possibility of ranking cyclically loaded elements of dynamic equipment according to the degree of damage to their material by fatigue cracks using acoustic emission (AE) measurements is discussed. As a result of special laboratory studies with varying loads in the cycle of loading and lubrication of the crack banks, the features of AE from the friction of the crack banks and plastic deformation at the crack tip during its growth in a viscous material have been established. It is shown that during cyclic loading of the material, AE signals from the friction of its shores are detected more steadily than AE signals from a crack jump with an increase in its length, and that tracking the former ensures the detection of fatigue damage of the material even under loading conditions insufficient for crack growth. Based on the data obtained, three AE signs of the presence of fatigue damage of the material of the elements of dynamic equipment were developed under the condition of cyclic activation of the movement of the crack banks. As a result of industrial testing of the developed AE features, their operability was confirmed and their boundary values on the operating trunnions of CDM drying cylinders were clarified, and a method for ranking trunnions by the level of damage by fatigue cracks was proposed. By comparing the results of AE measurements with ultrasound control, the reliability of the proposed approach was evaluated, which showed the

probability of detecting a fatigue crack in the trunnions of CDM drying cylinders at the level of 71 %, with the probability of their skipping and false rejection of the product 12 and 17 %, respectively. The developed technique is also transferable to other massive dynamic equipment after clarifying the boundary values of AE signs of fatigue damage of the material on this type of object.

Keywords: acoustic emission, metal fatigue, cracking, trunnion of drying cylinders, cardboard making machine, diagnostics.

DOI: 10.31857/S0130308223090014, **EDN:** EAKMQV

ВВЕДЕНИЕ

Картоно- и бумагоделательные машины (КДМ / БДМ) являются автоматическими поточными линиями непрерывного действия, в которых процесс сушки служит основным технологическим этапом, определяющим энергозатраты производства и итоговое качество продукции [1]. Сушильная часть КДМ / БДМ является самой металлоемкой, т.к. имеет наибольшую протяженность. Сушка выполняется с применением сушильных цилиндров, которые представляют собой вращающиеся сосуды давления, внутрь которых подается водяной пар (до 0,8 МПа, до +160 °С). Конструктивно сушильные цилиндры — сборочные единицы, состоящие из барабана, боковых крышек и двух цапф: лицевой и приводной (рис. 1). При этом цапфы могут быть выполнены заодно с крышками [2]. Обрыв цапф ведет к аварийной остановке производства и большим материальным затратам, т.к. сопровождается падением цилиндров с повреждением сушильного полотна и продукта (непрерывной ленты бумаги или картона большой ширины, например, 4,5 м, см. рис. 1). Однако, учитывая высокую скорость выпуска продукта (300 — 600 м/мин [3]), основной ущерб предприятия состоит не в стоимости замены сушильного цилиндра и полотна, а в потерях от простоя производства за время внепланового ремонта и необходимости остановки всей технологической цепочки, в которой наиболее острым вопросом является сохранение качества большого объема технологического запаса сырья в варочных котлах.

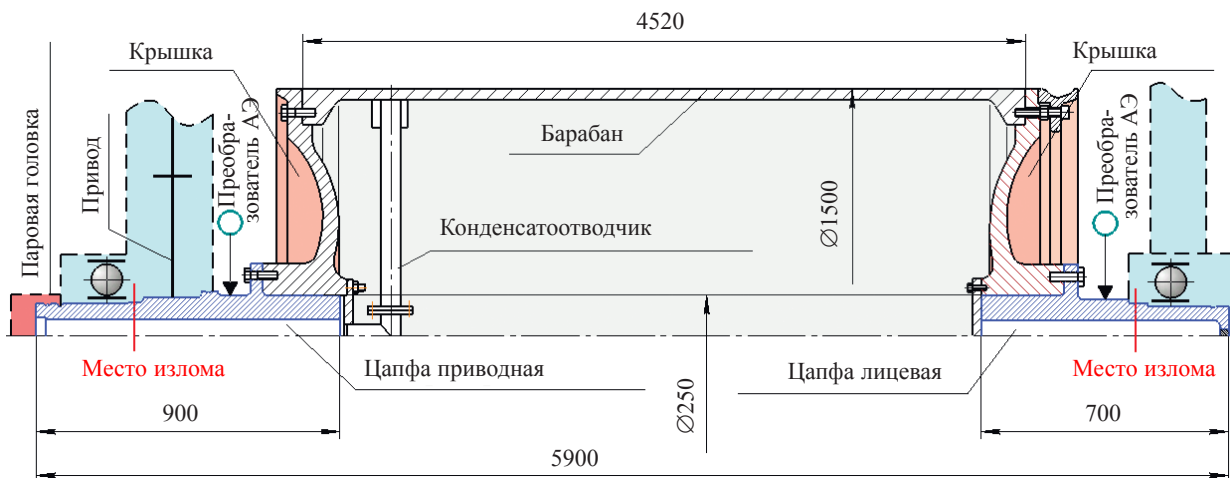


Рис. 1. Схема конструктивного исполнения сушильного цилиндра с указанием мест излома цапф и мест установки преобразователей акустической эмиссии.

Согласно статистике разрушений причиной обрыва лицевых и приводных цапф являются усталостные трещины, которые зарождаются на поверхности и развиваются вглубь цапф вблизи галтельных переходов в области подшипникового узла. Опасные места находятся внутри корпусов подшипникового узла и привода (см. рис. 1), что делает невозможным визуальный контроль, а также применение основных неразрушающих методов обнаружения трещин: ультразвукового, капиллярного, вихретокового и магнитного. В связи с этим, указанные методы применяются только после снятия сушильного цилиндра с КДМ / БДМ. Последнее проблематично, т.к. требует демонтажа привода и подшипниковых узлов, разборки многоярусной станины машины и поярусной выгрузки сушильных цилиндров. Количество сушильных цилиндров на КДМ / БДМ зависит от ассортимента вырабатываемой продукции, конструктивного исполнения, технологических параметров машин

и объема производства и на крупнотоннажных предприятиях достигает 100 штук на одной машине, т.е. 200 цапф. Между тем в рамках ежегодного планового капитального ремонта по временным и материальным затратам возможно поменять не более восьми сушильных цилиндров, т.е. 16 цапф. Следовательно, для проверки всех цапф основными методами только на одной машине с 100 сушильными цилиндрами потребуется 13 лет, что не может обеспечить выдвигаемое сегодня требование оперативной оценки технического состояния оборудования целлюлозно-бумажного производства для обоснования ремонтов по их техническому состоянию [4]. Таким образом, требуются методы, позволяющие организовать порядок вывода сушильных цилиндров для их дефектовки, а в случае цапф — методы оценки их поврежденности непосредственно на КДМ / БДМ. При этом указанная проблема актуальна не только для сушильных цилиндров КДМ / БДМ, но и для подобного вращающегося технологического оборудования [5, 6].

В процессе работы сушильных цилиндров непрерывно контролируется вибрация и нагрев подшипниковых узлов. Анализ вибрации и температуры, предшествующих произошедшим аварийным случаям с обрывом цапф не выявил диагностических признаков, по которым заблаговременно возможно было бы установить критическую поврежденность цапф, что обусловило необходимость в разработке новых методов для выявления поврежденности материала цапф. Высоко чувствительным к зарождению и распространению трещиноподобных дефектов является метод акустической эмиссии (АЭ), который не требует непосредственного доступа к опасному сечению, а эффективность и достоверность метода подтверждена теоретически [7, 8], лабораторно на широком спектре конструкционных материалов [7, 9, 10] и условий их нагружения [11, 12], а также при промышленном АЭ-контроле основных типов статического и динамического оборудования [13, 14]. При этом реализуется метод АЭ аналогично вибродиагностическому, но обладает гораздо большей чувствительностью к усталостным трещинам, что показано в [15—17].

Основным подходом оценки поврежденности элементов сушильных цилиндров сегодня является анализ АЭ при нагружении избыточным внутренним давлением (ASTM E2598). Однако данная методика не подходит для оценки АЭ поврежденности цапф, т.к. из-за толстостенности элемента испытательное давление в сушильном цилиндре не сможет спровоцировать развитие в цапфе усталостной трещины даже критического уровня. Другим негативным фактором является отсутствие при скачке усталостной трещины в вязких сталях явно различимых сигналов АЭ наблюдаемых при разрушении хрупких и квазихрупких материалов [7, 18, 19]. Обозначенное делает стандартный подход АЭ-контроля элементов сушильных цилиндров внутренним давлением не эффективным. Одним из альтернативных методов провоцирования генерации АЭ-трещиной в материале является его знакопеременное нагружение [7, 20, 21]. При этом контроль поврежденности материала цапфы по всему сечению может быть выполнен только путем вращения сушильного цилиндра, что практикуется при оценке поврежденности вращающихся силовых элементов машин и оборудования (опор вращающихся трубчатых печей [13], осей железнодорожной техники [22], подшипниковых узлов мотор-редукторов [23], валов зубчатых передач [24] и др.), но из-за разного соотношения «конструктивная особенность объекта контроля/местоположение опасного сечения» эффективность применения данного подхода различна. Последнее особенно важно в виду отсутствия возможности приложения дополнительной внешней силы к сушильным цилиндрам при их циклическом нагружении. Также к недостаткам обнаружения усталостных трещин АЭ-методом в условиях циклического нагружения объекта контроля относят высокий уровень сопутствующих шумов, что требует разработки и специальных мер для снижения ошибки АЭ-контроля [13, 25]. Таким образом, на сегодняшний день отсутствуют АЭ-методики и подходы для контроля поврежденности цапф вращающегося оборудования. Целью настоящей работы было исследование признаков АЭ наличия усталостных трещин в циклически нагруженном материале для разработки методики АЭ ранжирования элементов оборудования по поврежденности усталостными трещинами с последующей ее апробацией на реальном промышленном объекте.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований являлась АЭ, возникающая в материалах сталь 20Л и 45Л при наличии в них усталостной трещины, зарождение и движение которой имитировали в лабораторных и промышленных условиях.

Лабораторные исследования приводились во время испытаний материала на рост усталостной трещины в соответствии с ASTM E647. Испытания проводились на сервогидравлической машине 8802 (Instron, Англия—США) по схеме одноосного растяжения в режиме контроля приложенной

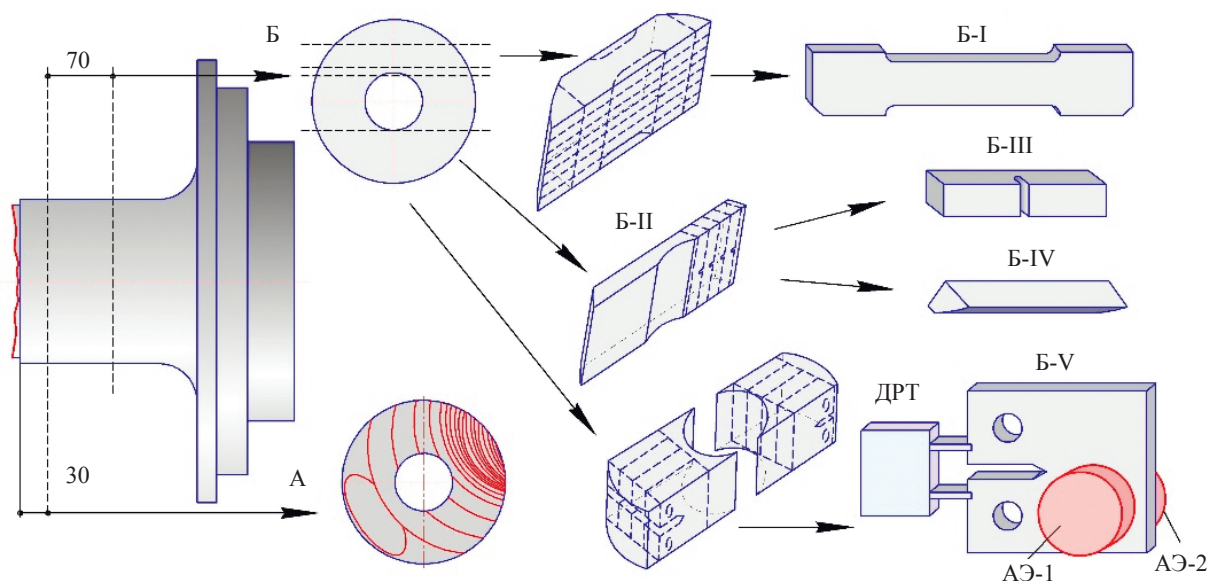


Рис. 2. Схема раскроя разрушенной цапфы на образцы, где: А — фрагмент для фактографического анализа излома; Б — фрагмент для роспуска на образцы для: механических испытаний на разрыв (Б-I); измерения твердости (Б-II); оценки ударной вязкости (Б-III); оценки химического состава и структуры металла (Б-IV); испытаний на рост усталостной трещины (Б-V). На рисунке обозначено: ДРТ — тензометрический датчик раскрытия трещины; АЭ-1 и АЭ-2 — преобразователи первой и второй АЭ системы соответственно.

силы, изменяющейся по синусоидальному закону с постоянной частотой 10 Гц в диапазоне нагрузок 1—10 кН (коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$). Приращения и остановки роста трещины при испытаниях отслеживались с помощью тензометрического датчика раскрытия трещины типа 3541-020M-025M-ST (Epsilon Technology, США) и тепловизора SC7700M (FLIR, США) с оптической системой Microscope lens G1 F/2x1. Тепловые измерения проводили в спектральном диапазоне MWB или MWIR (3,7 — 4,8 мкм, 5 — 150 °C) на поле наблюдения 9,6×7,7 мм (640×512 px) при скорости записи: 25, 50 и 115 кадров в секунду (fps). Для имитации АЭ от различных источников движения трещины использовались специальные режимы нагружения образца и изменения условий его работы, которые будут описаны далее.

Лабораторные исследования проведены на компактных образцах типа СТ (по ASTM E647) размером: 48×50×10 мм (Б-V на рис. 2). Концентратором напряжений в них являлся вырез 20×2 мм с клином с углом при вершине 30° и радиусом скругления 0,18 мм. СТ-образцы вырезались непосредственно из цапф сушильных цилиндров электроэрозионным способом с жидкостным охлаждением путем погружения в ванну. При этом направление выреза образцов и концентратора напряжений в них ориентировалось относительно направления роста трещин, приводивших к разрушению цапф на КДМ (см. рис. 2). Последнее выполнялось с целью учета анизотропии характеристик материала по сечению цапф, которые возникают при многоэтапной технологии их изготовления (литье с последующей ковкой, точением и поверхностной термообработкой).

Промышленные исследования проводились на учебном стенде и непосредственно на двух КДМ крупнотоннажного производства. Учебный стенд представляет собой один из сушильных цилиндров КДМ в сборе, установленный на ступенях с подшипниковыми узлами, но без приводной шестерни и паровой головки (рис. 1 и 3). Сами же КДМ имеют в общей сложности 196 сушильных цилиндров (392 цапфы) разного года выпуска и установки (новые и со сроком эксплуатации до 25 лет). Кроме этого, на предприятии имелось несколько цапф с трещинами и цапфы аварийно вышедшие из строя. Таким образом, в совокупности промышленные исследования обеспечили высокий уровень выборки объектов исследований.

В лабораторных исследованиях АЭ регистрировали в беспороговом режиме 2-х канальной исследовательской системой PCI-2 (РАС, США) и параллельно в пороговом режиме — 16-и канальной промышленной системой A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», Россия). В промышленных исследованиях использовалась только АЭ система A-Line 32D. Беспороговая запись, которая на сегодня реализуется только в исследовательских комплексах и позволяет проводить регистрацию АЭ без

пропусков, была необходима для оценки степени искажения информации и работоспособности АЭ-критериев при переходе от лабораторной аппаратуры к промышленной, работающей в пороговом режиме, т.е. с пропуском части данных АЭ. В лабораторных исследованиях АЭ регистрировали в диапазоне частот 20—1000 кГц с помощью пьезопреобразователей MSAE-1300WB (ООО «Микросенсорс АЭ», Россия) и пьезопреобразователей П111-(0,05-0,8) (Россия), а при промышленных — последними преобразователями в диапазоне 30—500 кГц. Преобразователи АЭ к СТ-образцам крепили на противоположной вырезу стороне образца с помощью эпоксидной смолы (АЭ-1 и АЭ-2 на рис. 2), а на цапфах — в местах, показанных на рис. 1 и 3, с помощью магнитных держателей через консистентный смазочный материал Литол-24. Частота дискретизации при записи АЭ во всех исследованиях составляла 2 МГц. Перед исследованиями преобразователи АЭ калибровались на генераторе акустических импульсов MSAE-UCA01 (ООО «Микросенсорс АЭ», Россия) [26] по методике ASTM E976. Запись и анализ откликов пьезопреобразователей на калиброванное воздействие генератора выполнялось с помощью обозначенных систем АЭ и параллельно подключенным цифровым осциллографом Wave Runner 44Xi-A (LeCroy, США).

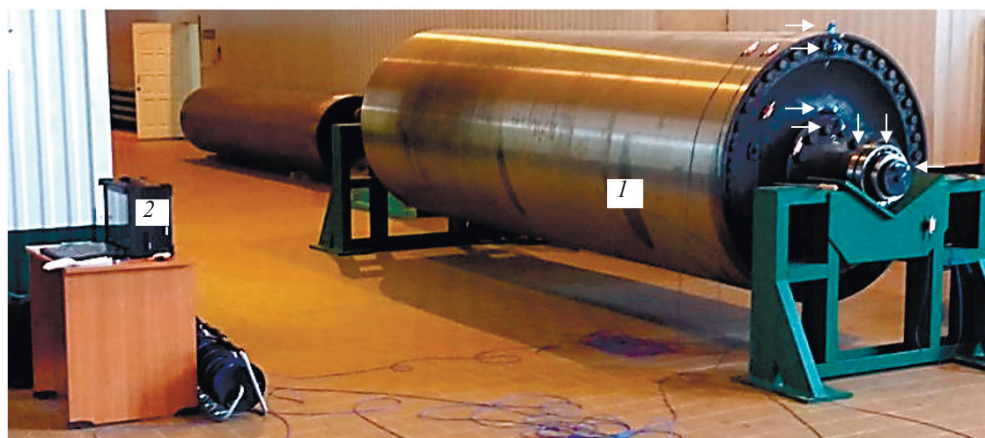


Рис. 3. Общий вид учебного станда (1), АЭ-системы (2) и места установки преобразователей АЭ при проведении исследований на нем (указаны стрелками — на лицевой стороне, на приводной стороне устанавливались аналогично).

Фрактографическое исследование изломов цапф (см. образцы А на рис. 2) проводили с помощью металлографического микроскопа Stemi 2000 (Zeiss, Германия). При этом расстояние между бороздками (скачками) трещины в зоне линейной скорости ее роста измеряли с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma (Zeiss, Германия). Исследование структуры металла цапф (см. образцы Б-IV на рис. 2) проводили на микроскопе Axiovert 40 MAT (Zeiss, Германия) по ГОСТ 5640 с помощью программы количественного структурного и фазового анализа Thixomet PRO (Thixomet, Россия). Химический состав материала (см. образцы Б-IV на рис. 2) подтверждали на Q4 TASMAN (Bruker, Германия) по ГОСТ Р 54153, механические характеристики определяли с помощью твердомера HB-3000B (Time Group, Китай) по ГОСТ 9012, маятникового копра JB-W300 (Time Group, Китай) по ГОСТ 9454 и разрывной машины H50KT (Tinius Olsen, Англия) по ГОСТ 1497 (см. соответственно образцы Б-II, Б-III и Б-I на рис. 2). Проверка наличия трещин в цапфах проводилась ультразвуковым методом с помощью дефектоскопа Томографик УД-4Т (ООО «ВО-ТУМ», Россия) на контрольной частоте 2,5 МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ рельефа изломов аварийных цапф позволил установить общую схему разрушения, которая применительно к одному из изломов показана на рис. 4. Из рис. 4а видно, что излом цапфы имеет сложную конфигурацию: 3/5 поверхности излома представляет сравнительно плоскую поверхность, практически нормальную к оси цапфы, а 2/5 поверхности излома имеют сильные перепады. Микротрещины зародились вблизи галтели перехода к меньшему диаметру цапфы, сыгравшего роль концентратора напряжений. Очаги зарождения микротрещин на схеме рис. 4б показаны красными кругами. Зоны роста микротрещин обозначены голубым цветом. Зародившись в разных,

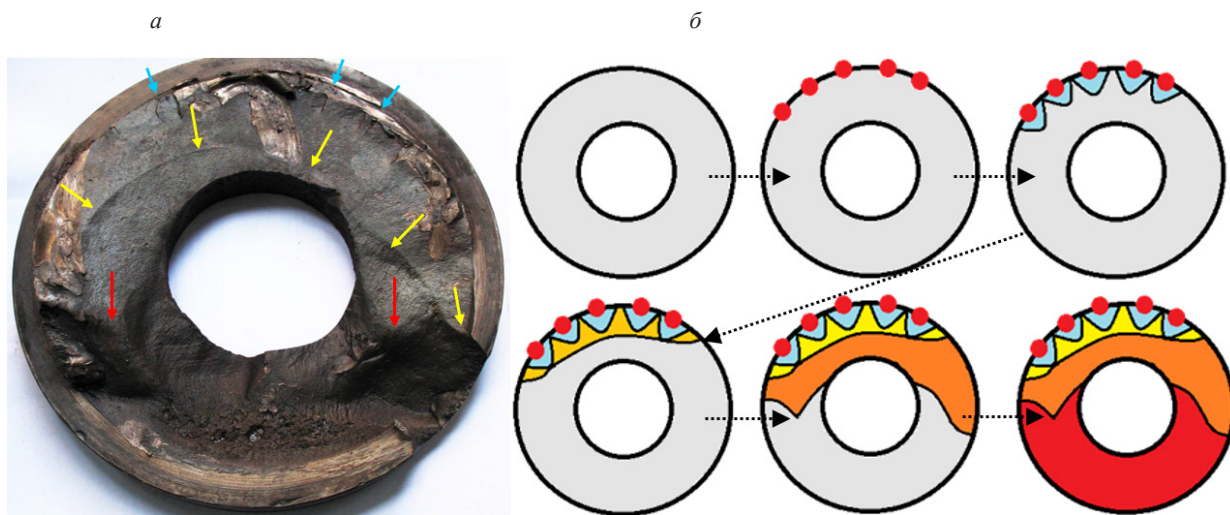


Рис. 4. Общий вид излома (а) и схема разрушения цапф (б) при движении трещин (стрелки) по соответствующим зонам (цвет стрелок и зон).

но близких друг к другу сечениях, микротрещины в процессе своего продвижения соединились в одну усталостную трещину (желтый цвет) и образовали ступени сдвига и гребни, параллельные направлению роста трещины. Усталостная трещина росла до излома цапфы в пределах оранжевой зоны. Красная — зона долома во время обрыва цапфы. Принимая во внимание тот факт, что протяженность зоны усталостного развития трещины составляет не менее 100 мм, а измеренное расстояние между бороздками (скачок) трещины в зоне линейной скорости ее роста составляло 0,5—1,0 мкм, можно сделать вывод, что разрушение произошло по механизму многоциклового усталости (более 1 млн циклов) и напряжение цикла было не очень высоким (близкое к пределу усталости). Исследование химического состава, структуры и механических характеристик (твердость, ударная вязкость, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение) материала аварийных цапф показало его полное соответствие всем нормативным требованиям к материалу и изделию. Из вышесказанного сделан вывод о том, что эксплуатация материала в составе БДМ не приводит к существенной деградации свойств, охрупчиванию или разупрочнению стали, поэтому усталостный механизм разрушения цапфы принят в качестве основного. Таким образом, учет только присутствия усталостной трещины в материале можно считать корректным приближением для исследования и выработки диагностического АЭ-признаков дефектности материала.

По результатам лабораторных испытаний материала на рост усталостной трещины средний размах коэффициента интенсивности напряжения в начале и конце линейной части кинетической диаграммы усталостного разрушения материала составил $\Delta K_I = 22,9 \pm 2,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и $\Delta K_{II} = 34,4 \pm 2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Эти данные были использованы для установления границ стадий роста трещины на зависимости приращения ее длины от циклов нагружения, которые на рис. 5а обозначены n_I и n_{II} и разделяют на: I — стадию припорогового медленного роста трещины (по литературным данным скорость роста трещин на данном этапе порядка 10^{-7} — 10^{-8} мм/цикл); II — стадию стабильного роста трещины (на данном этапе скорость роста трещины подчиняется закону П.К. Пэриса); III — стадию ускоренного (неустойчивого) роста трещины (скорость роста трещины резко увеличивается).

Максимальный уровень внешнего акустического фонового шума на сушильных цилиндрах в составе БДМ во время проведения капитального ремонта составил 38 дБ, а средний коэффициент затухания волн АЭ в цапфах — 45,5 дБ/м. Расстояние между преобразователем АЭ (ПАЭ) и контролируемой зоной на лицевой цапфе порядка 45 мм, а на приводной — 315 мм (см. рис. 1), таким образом в месте регистрации АЭ следует ожидать уменьшение амплитуды сигналов на уровне 2,0 и 14,3 дБ соответственно. Учитывая фоновый шум и затухание источник АЭ на лицевой цапфе будет обнаружен если амплитуда его сигналов будет более 40 дБ (100 мкВ), а на приводной цапфе — более 52,3 дБ (412 мкВ). В работе [7] показано, что данным амплитудам сигналов АЭ соответствуют скачки трещин ~50 и ~200 мкм соответственно. По данным того же литературного источника при наблюдаемом на изломах аварийной цапфы расстоянии между бороздками (скачках) трещины в

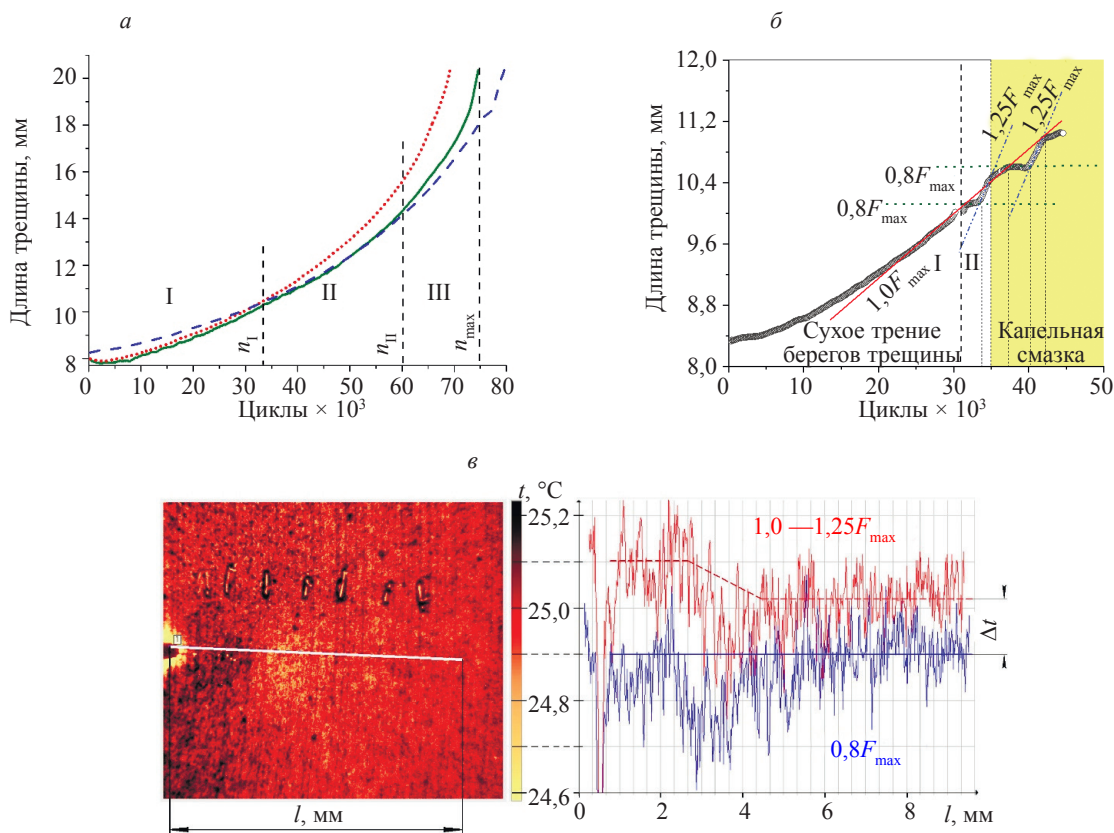


Рис. 5. Зависимость приращения длины усталостной трещины от числа циклов нагружения по стандартной методике ASTM E647 (а) и специальной — для имитации различных источников АЭ (б). На рисунке (в) при общей шкале температуры справа цветом показано тепловое поле, формируемое при росте трещины, а слева графически — повышение распределения температуры (Δt) по белой измерительной линии длиной l , проложенной по траектории роста трещины при нагрузках в циклах $1,0$ и $1,25F_{max}$ относительно режима $0,8F_{max}$. Все обозначения расшифрованы в тексте.

зоне линейной скорости ее роста $0,5$ — $1,0$ мкм амплитуда сигналов АЭ не должна превышать 2 мкВ (6 дБ). Таким образом, в реальных промышленных условиях АЭ-измерений даже при установке ПАЭ вблизи зоны развития трещины вероятность ее обнаружения с помощью метода АЭ маловероятна. Однако работа цапфы с трещинами в режиме изгиба с вращением обязательно сопряжена с поворотом берегов относительно вершины трещины, причем дважды за каждый рабочий цикл (полный оборот) при сменах напряжений от растяжения к сжатию и наоборот. Соответственно, следует ожидать АЭ от трения берегов трещины при каждой разгрузке после сжатия или растяжения волокон, что повышает вероятность обнаружения данного источника АЭ.

На основании вышеприведенных фактов возникла идея: в основу оценки усталостной поврежденности (обнаружения наличия трещины) цапф положить выявление признаков АЭ трения берегов трещины, а за способ активации источника АЭ (способ нагружения) — вращение сушильного цилиндра непосредственно на КДМ. Таким образом, потребовалось разделить сигналы АЭ не только по стадиям роста трещины, но и по основным источникам АЭ, которыми в вязком материале являются: пластическая деформация с разрывом в вершине трещины и трение берегов трещины [7].

Исследование АЭ от указанных основных источников проводили на другой партии СТ-образцов путем выращивания усталостной трещины до стадии стабильного роста II (рис. 5б), наличие которой устанавливалось по кинетической диаграмме усталостного разрушения материала. Затем нагрузка в цикле пропорционально снижалась до величины $0,8F_{max}$ (при всех неизменных других параметрах нагружения), где F_{max} — пиковая нагрузка в цикле (10 кН). При данной нагрузке трещина не росла, что подтверждалось по данным с датчика раскрытия трещины (рис. 5б) и тепловизора (рис. 5в), т.к. известно [27], что рост трещины сопровождается нагревом в ее вершине и материала вокруг (Δt на рис. 5в). Таким образом, на нагрузке $0,8F_{max}$ сигналы АЭ должны преимущественно

быть связаны с трением берегов трещины. Затем нагрузка увеличивалась до величины $1,25F_{\max}$. Такой режим нагружения приводил к увеличению скорости роста трещины (см. рис. 5б) и восстановлению температурного поля вокруг ее вершины до значения при нагрузке $1,0F_{\max}$ (см. рис. 5в). Этим режимом имитировалась АЭ от пластической деформацией материала в вершине трещины большей мощности, возникающей по причине большей величины приращения ее длины, чем на нагрузке $1,0F_{\max}$. Далее процедура изменения режима нагружения повторялась, но с капельным вводом жидкого минерального масла И-20А SN-150 (OilRight, Россия) в устье трещины с помощью шприца. Данный смазочный материал не имеет присадок и наполнителей, устойчив к окислению, отличается пониженным пенообразованием и имеет высокий класс вязкости, поэтому под действием вибрации и капиллярных сил смазка затягивалась вглубь трещины и уменьшала трение, т.е. снижала уровень АЭ от трения берегов трещины на всех режимах нагружения. Поскольку АЭ и температура образца регистрировалась непрерывно, то по фиксированным временным меткам начала и окончания выхода на режим или введения смазочного материала возможно выделить характеристики сигналов АЭ генерируемых исследуемыми источниками. Кроме этого, для понимания шума, сопровождающего работу гидравлической системы нагружения образца и трение в захватах, записывалась АЭ с компактного образца, в котором отсутствовал концентратор напряжения (вырез). Жесткости такого образца было достаточно, чтобы гарантировать невозможность зарождения в нем трещины за короткое время записи АЭ шума испытательной машины, которое проводилось при тех же нагрузках ($0,8$; $1,0$ и $1,25F_{\max}$) и два раза: до и после смазывания подвижных элементов захватов.

В результате анализа изменения АЭ за цикл нагружения (рис. 6) установлено, что на режиме $0,8F_{\max}$ до и после смазывания АЭ существенно не отличается и по уровню сопоставима с АЭ, снятой с образца без выреза. При этом в местах цикла нагружения (показаны стрелками на рис. 6), установленных в работах [18, 19], АЭ до смазывания берегов трещины превышает АЭ после смазывания. Таким образом, сигналы АЭ на режиме $0,8F_{\max}$ в пределах данных временных меток связаны с трением берегов трещины. Сопоставление АЭ на режиме $1,25F_{\max}$ до и после смазывания также показывает снижение АЭ на тех же временных метках (рис. 6б). Сопоставление режимов $1,25F_{\max}$ без смазывания берегов трещины и $0,8F_{\max}$ после смазывания (рис. 6в) наглядно показывает указанные отличия в АЭ в контрольных метках. Полученные данные также подтверждают выводы работ [18, 19], в которых расчетно и экспериментально показано, что уровень сигнала АЭ при росте трещины в вязких сталях (к которым относятся 20Л и 45Л) настолько мал, что при пороговом режиме регистрации слежение за развитием трещины возможно наблюдать только по двум энергичным сигналам АЭ, не совпадающих с пиком изменения нагрузки (см. рис. 6). При этом наличие двух пиков АЭ и их положение также совпадает с данными обозначенных работ, а именно с моментом раскрытия трещины при увеличении напряжения в цикле и моментом закрытия трещины на обратном ходе. Согласно тем же работам, трение берегов, хоть и в меньшей степени (не на всю длину трещины), происходит и в знакопостоянных циклах. Наличие «провала»

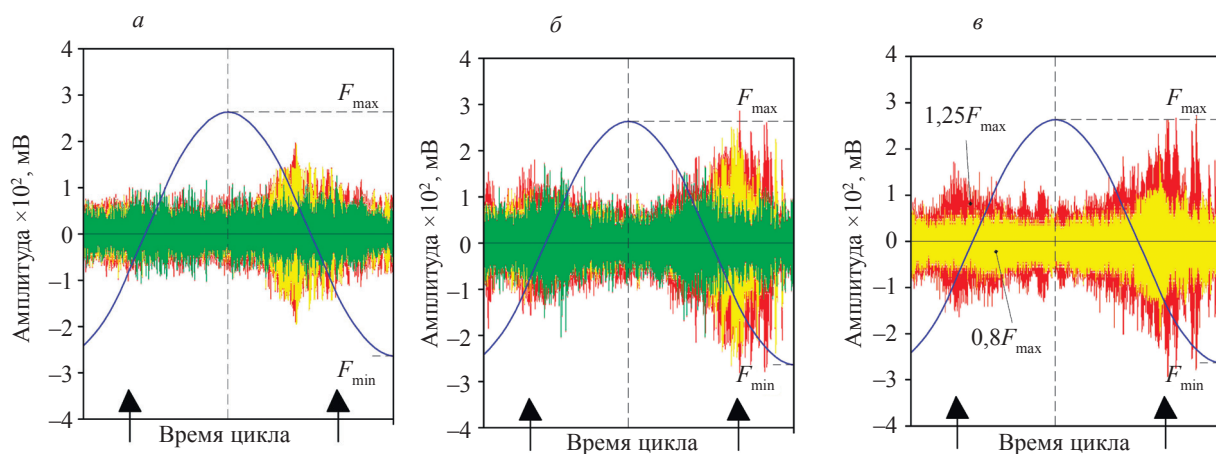


Рис. 6. Общий вид АЭ, сопровождающий циклы нагружения образца при нагрузке $0,8F_{\max}$ (а), $1,25F_{\max}$ (б) и обеих нагрузках (в) при разных условиях трения берегов трещины, которые показывает цвет графика: зеленый — трещины нет (образец без выреза); красный — сухое трение берегов трещины; желтый — трение берегов трещины со смазкой.

АЭ между высокоамплитудными пиками в цикле — не что иное, как возврат АЭ к общему уровню акустического шума цикла, который увеличивается и уменьшается синхронно с ним. Длительность трения берегов трещины в нашем случае задается режимом нагружения, но по данным [28, 29] время генерации АЭ сигналов до момента возвращения берегов трещины в исходное состояние может быть достаточно продолжительным (до 0,4 с) и фиксируется в широком диапазоне частот (до 600 кГц), что также подтверждает перспективность использования данного вида источника в качестве диагностического признака наличия трещины в материале.

Анализ всех результатов лабораторных исследований показал, что наиболее чувствительными к стадиям роста трещины и мало зависящими от уровня порога дискриминации являются параметры АЭ: амплитуда (А) и MARSE (Measured Area under Rectified Signal Envelope). Кроме этого, согласно работ [30, 31], данные параметры хорошо описывают лавинные процессы к которым, помимо деформационных процессов в вершине трещины можно отнести и коллективное контактирование микронеровностей ее берегов при их быстром сдвиге. Параметры А и MARSE позволяют выделить АЭ-трения берегов трещины (■) от остальных сигналов (○) с использованием всего двух условий, при этом сигналы ■ и ○ формируют хорошо различимые кластеры, которые имеют незначительную область пересечения (рис. 7б). При зарождении трещины (см. участок I на рис. 5) амплитуда сигналов АЭ и MARSE не превышает 60 дБ и $16 \cdot 10^7$ у.е. соответственно. На стадии линейного роста трещины (см. участок II на рис. 5) дополнительно к сигналам АЭ I участка регистрируются сигналы амплитудой 60—76 дБ и MARSE более $24 \cdot 10^7$ у.е. На стадии критического (ускоренного) роста трещины (см. участок III на рис. 5) скачки трещины гораздо больше, поэтому амплитуда сигналов АЭ выше и достигает порядка 90 дБ, MARSE 40×10^7 у.е. В связи с этим граничные значения параметров амплитуды и MARSE приняты за первый АЭ-признак поврежденности материала цапф сушильных цилиндров усталостными трещинами.

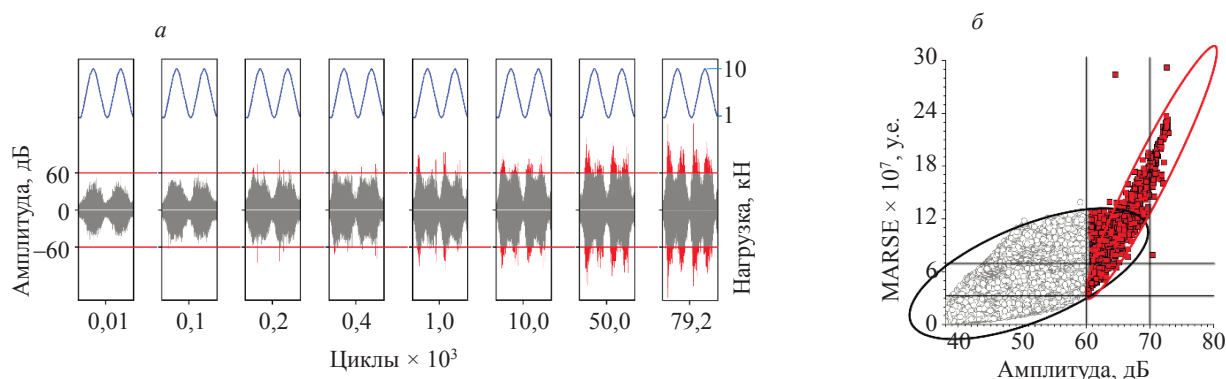


Рис. 7. Общий вид изменения АЭ в цикле нагружения за время испытания по стандартной методике ASTM E647 и выделение сигналов АЭ от трения берегов трещины (красный цвет) по амплитуде (а) и амплитуде + MARSE (б).

Также из рис. 7а видно, что по мере приближения к разрушению повышается количество регистрируемых сигналов (выделены красным цветом) и, следовательно, скорость их прихода, а также существенно изменяется вид кривой изменения АЭ за цикл нагружения по сравнению с начальным («бездефектным») состоянием образца. Поэтому за второй АЭ-признак поврежденности цапф принята повторяемость проявления АЭ за время нагружения и граничные значения количества зарегистрированных сигналов по контрольным участкам в сравнении с признаками «бездефектного» или «дефектного» объекта контроля полученных при той же скорости их нагружения в предварительных исследованиях.

Промышленные исследования позволили подтвердить работоспособность установленных АЭ-признаков и скорректировать их граничные значения для оценки усталостной поврежденности материала цапф в условиях проведения цехового контроля. Для этого исследования проводили на «бездефектных» и «дефектных» цапфах, а полученные на них АЭ-данные являлись опорными. При этом в качестве дефектных использовались четыре сушильных цилиндра, в цапфах которых при ультразвуковом контроле (УЗ) были обнаружены признаки трещиноподобных дефектов в контрольном сечении (см. табл. 3). В качестве «бездефектных» цапф использовались те же четыре сушильных цилиндра после замены дефектных цапф на новые в которых при УЗ контроле признаков

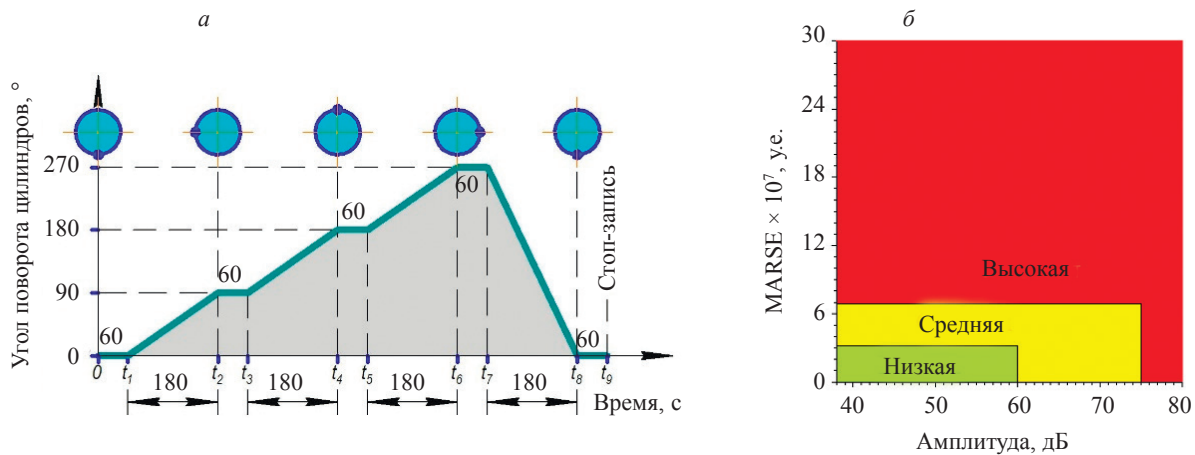


Рис. 8. График нагружения цапф сушильных цилиндров (один оборот) (а) и уточненное в промышленных исследованиях классификационное поле оценки поврежденности цапф по первому АЭ-признаку (рис. 7б).

дефекта в контрольном сечении не обнаружено. Кроме этого, УЗ методом была оценена дефектность 91 цапфы разной степени поврежденности, установленной по АЭ-данным. При промышленных исследованиях нагружение опасного сечения цапф с целью активации движения берегов трещины проводилось собственным весом сушильных цилиндров (6520 кг) путем их проворачивания по графику, представленному на рис. 8.

В результате промышленных исследований выявлено, что лабораторно установленные закономерности и АЭ-признаки позволяют выявить дефектные цапфы, но с учетом следующей корректировки. Классификационное поле параметров «амплитуда — MARSE» разделено на уровни по вероятности поврежденности цапф сушильных цилиндров: низкое, среднее и высокое (рис. 8б). На «бездефектных» цапфах регистрируемая АЭ по амплитуде и MARSE не превышала 60 дБ и $3,3 \cdot 10^7$ у.е. соответственно, поэтому при данных АЭ-признаках принимается низкая поврежденность цапф. При любой амплитуде АЭ при MARSE более $6,7 \cdot 10^7$ у.е. устанавливается высокая степень поврежденности, т.к. данный АЭ-признак наблюдался на дефектных цапфах. Однако нижняя граница зоны высокой поврежденности цапф по сравнению с лабораторными исследованиями снижена до 60 дБ, что имеет цель компенсировать затухание сигнала и погрешность установки преобразователя АЭ. Поскольку при этом MARSE уменьшается медленнее, то учет возможного смещения «полезных» сигналов в данную область компенсируется только по амплитуде. При значениях амплитуды и MARSE соответственно 60—70 дБ и $(3,3—6,7) \cdot 10^7$ у.е. присваивается средняя степень поврежденности цапфы, как наблюдаемая в лабораторных исследованиях на стадии зарождения трещины и занимающая промежуточное значение между данными АЭ, полученными на «дефектных» и «бездефектных» цапфах при промышленных исследованиях. Продление зоны средней дефектности вниз до 38 дБ (уровня цехового шума) также имело цель компенсировать затухание сигнала и погрешность установки преобразователя АЭ, что приводит к смещению «полезных» сигналов в данную область.

В качестве параметра оценки АЭ для второго признака был выбран параметр — активность АЭ ($\dot{N}(t)$) за цикл нагружения, т.к. ее изменение коррелирует с параметром MARSE и является более универсальным оценочным параметром. В исследованиях на «бездефектных» (новых) цапфах $\dot{N}$ не превышала 36 имп/с, но на цапфах, которые эксплуатировались и имели по первому АЭ-признаку низкую поврежденность $\dot{N}$, фиксировалось до 70 имп/с. На дефектных цапфах $\dot{N}$ составляла более 90 имп/с. Для получения кривой изменения $\dot{N}(t)$ применялась процедура сглаживания в виде вычисления среднего значения активности АЭ ($\bar{a}_N$) скользящим окном. В качестве алгоритма оценки степени подобия изменения $\bar{a}_N$ между циклами нагружения использовался коэффициент достоверности аппроксимации или R -квадрат, который предложен для поиска подобия в кривых спектральной плотности мощности АЭ-сигналов и подробно описан в работе [32]. Средняя кривая $\bar{a}_N$, полученная на «бездефектных» цапфах, принята за опорную кривую, с которой сравнивались все остальные. В результате сравнения получено, что при средней и высокой степени поврежденности цапф по первому АЭ-признаку и $\dot{N}$ степень подобия кривых $\bar{a}_N$ с опорной (обозначено далее как R^2) не более 15 %.

Апробация предлагаемого подхода в промышленных условиях в период капитального ремонта оборудования показала, что при АЭ-измерениях часто возникают случайные помехи и шумы высокой амплитуды и MARSE, что сопровождается повышением и активности регистрации сигналов АЭ. В связи с этим при массовом контроле (многоканальной системой АЭ) применение только первого и второго АЭ-признаков приводит к ошибке идентификации степени поврежденности цапф усталостными трещинами. Поэтому для повышения достоверности результатов АЭ-измерений был введен третий признак поврежденности цапф, который также основан на установленной закономерности проявления АЭ от трения берегов трещины в циклах нагружения без и с ее приращением (см. рис. 5—7). Из рис. 7а хорошо видно, что если трещина в теле объекта исследования отсутствует/присутствует, то в пределах нескольких циклов нагружения с одинаковой скоростью характер изменения АЭ имеет высокий уровень подобия, т.е. повторяться от цикла к циклу нагружения. Поэтому проверка закономерности проявления АЭ между выполненными подряд циклами нагружения положена в основу третьего АЭ-признака. Для этого также используется средняя кривая изменения активности АЭ $\bar{a}_N$ и критерий подобия R -квадрат (который в данном случае применения обозначен как R^2_2). При этом подобие АЭ оценивается последующего цикла нагружения к предыдущему внутри одного АЭ-измерения на одной и той же цапфе, а не с АЭ на другой «бездефектной» или «дефектной» цапфе, как во втором признаке АЭ. Здесь критерием поврежденности является условие: в каждом измерении АЭ по каждой цапфе $\bar{a}_N$ минимум в трех из пяти циклов нагружения должно иметь уровень подобия R^2_2 более 30 %. В противном случае средний и высокий класс поврежденности цапф считается вызванным внешней случайной помехой. Следует выделить, что добавление третьего признака позволило устранить этап фильтрации данных АЭ и тем самым повысить оперативность принятия решения, что важно, т.к. перепроверить результат измерений АЭ другими методами неразрушающего контроля возможно только в период капитального ремонта.

Обозначенные контрольные параметры трех признаков АЭ и их уточненные граничные значения сведены в классификационную табл. 1, а пример результатов АЭ-измерений, получаемых при промышленном контроле цапф БДМ, соответствующих установленным АЭ-признакам низкой, средней и высокой поврежденности, приведен в табл. 2. Отметим, что сделанные выводы и основанные на них АЭ-признаки в полной мере правомерны только в условиях циклического нагружения материала с трещиной.

Таблица 1

Контрольные параметры и их граничные значения

АЭ-признак	Контрольный параметр	Степень дефектности цапф		
		Низкая	Средняя	Высокая
I	Амплитуда, дБ MARSE, у.е.	< 60* < 3,3·10 ⁷	60—75** < 6,7·10 ^{7**}	> 75 < 6,7·10 ⁷
II	$\dot{N}$, имп/с R^2_1 , %	< 36 Не определяется	≥ 70 < 15	≥ 90 < 15
III	R^2_2 , % Количество повторов	Не определяется Не определяется	> 30 3 из 5 циклов нагружения (оборотов)	

* — допускается не более 10 (десяти) импульсов, амплитудой выше 60 дБ, но не более 75 дБ;

** — допускается не более 5 (пяти) импульсов, амплитудой более 75 дБ, или MARSE более 6,7·10⁷ у.е.

На основании данных исследований разработана «Экспресс-методика оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин», зарегистрированная за № МАЭК-СЦКДМ-001-2019, которая при диагностике цапф сушильных цилиндров КДМ в капитальный ремонт 2018, 2019, 2021 и 2022 гг. показала следующие результаты. По методике в общей сложности за 56,4 ч затраченного времени на измерения АЭ в капитальный ремонт (8,3 ч в 2018 г.; 11,7 ч в 2019 г., 18,6 ч в 2021 г. и 17,8 ч в 2022 г.) было проконтролировано 264 цапфы (или 132 сушильных цилиндра) непосредственно на КДМ за 13 установок (1 установка = 1 развертывание / 1 контроль / 1 свертывание) системы АЭ (3 в 2018 г., 4 в 2019 г., 3 в 2021 г. и 3 в 2022 г.). Всего на КДМ 392 цапфы (196 цилиндров), т.е. за обозначенное время в прямом счете было обследовано 67,3 % цапф КДМ. Учитывая, что ежегодный плановый капитальный ремонт

Таблица 2

Пример результатов измерений, соответствующих низкой, средней и высокой поврежденности цапф на трех признаках оценки АЭ-данных



* — на рисунках черными горизонтальными линиями отделены предельные уровни АЭ-активности по табл. 1, а цифрами и вертикальными линиями — циклы нагружения (обороты цилиндра). Синие линии — вид кривых $\bar{a}_{A_0}$, которые использовались для расчета R_1^2 и R_2^2 , и в данном случае имеют значения $R_1^2 < 0,06$, $R_2^2 > 0,49$ и $R_1^2 < 0,11$, $R_2^2 > 0,44$ соответственно для среднего и высокого уровня поврежденности. Нагружение осуществлялось по графику рис. 7.

КДМ составляет 7 дней (168 ч) то видно, что по данной методике реально провести контроль всех цапф КДМ за время останова. Однако это при прямом счете, а фактически за указанное время было проконтролировано 178 цапф, т.к. 86 из 264 цапф (43 сушильных цилиндра) контролировались каждый раз для сравнения и отслеживания динамики изменения технического состояния и признаков АЭ. Следует также выделить, что из-за необходимости разбора навесных элементов за это же время УЗ способом на прямом луче удалось проверить 112 цапф, из которых 107 лицевых (УЗ контроль возможен после снятия крышки подшипникового узла) и всего 5 приводных (доступных для УЗ контроля только после демонтажа паровой головки). Против 264 цапф (132 лицевых и приводных), проконтролированных методом АЭ. Таким образом, по производительности контроля предлагаемой АЭ-методикой относительно УЗ метода получаем двухкратное превосходство, из-за отсутствия необходимости демонтно-монтажных работ и меньших трудозатрат на подготовку объекта к контролю. Многолетняя статистика позволила оценить достоверность предлагаемой АЭ-методики посредством сопоставления результатов измерений АЭ и УЗ, выпол-

Таблица 3

Матрица достоверности АЭ-методики оценки усталостной поврежденности материала цапф сушильных цилиндров

Метод контроля и оценка его результатов для всех объектов сравнения, $n_{\Sigma} = 91$ цапфа		Эталонный метод контроля дефекта в цапфах — ультразвуковой	
		Число эталонно годных цапф	Число эталонно негодных цапф
АЭ-контроль по МАЭК-СЦКДМ-001-2019	Число годных цапф	Дважды годные $n_{\Gamma} = 57$	Недобраковка $n_{\beta} = 11$
	Число негодных цапф	Перебраковка $n_{\alpha} = 15$	Дважды негодные $n_{\Pi} = 8$

ненных в одно и то же время. Оценка достоверности АЭ была проведена по рекомендациям [7]. Матрица достоверности методики АЭ представлена в табл. 3.

Из табл. 3 получаем: вероятность принятия безошибочного решения (достоверность АЭ-контроля): $D_{\text{АЭ}} = (n_{\Gamma} + n_{\Pi}) / n_{\Sigma} = 0,71$; вероятность пропуска дефекта $P_{\beta} = n_{\beta} / n_{\Sigma} = 0,12$ и вероятность перебраковки $P_{\alpha} = n_{\alpha} / n_{\Sigma} = 0,17$. Причиной достаточно высокого показателя перебраковки по нашему мнению является наличие у объекта контроля нескольких возможных параллельно действующих источников АЭ: повышенное трение и износ в подшипниковом узле, ослабление или обрыв болтов крепления цапф, заедание в зубчатой передаче, перекос установки сушильного цилиндра, наличие мусора в сушильном цилиндре и др. Однако их влияние на результат АЭ-измерений еще предстоит исследовать, как и вопрос возможности применения разработанной методики для параллельного выявления альтернативных причин (источников) выхода сушильных цилиндров из строя. Несмотря на вышесказанное, очевидно, что апробация реализованного в методике нового подхода подтвердила его работоспособность, а устранение или добавление в анализ АЭ-признаков вышеобозначенных дополнительных источников может быть осуществлено путем корректировки границ, установленных для параметров классификации. Поскольку, несмотря на трехуровневую процедуру формирования итогового вывода, сохраняется некоторая неопределенность АЭ-контроля, связанная с наличием других возможных акустических источников, в методике заложена обязательность подтверждения трещины УЗ контролем в случае установления высокой степени поврежденности цапфы, и рекомендуемым — при средней степени поврежденности.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально показано, что при циклическом законе нагружения вязкого материала с трещиной сигналы АЭ от трения ее берегов обнаруживаются более устойчиво, чем сигналы АЭ от скачка трещины при приращении ее длины, что определяет возможность обнаружения усталостных трещин даже в условиях нагружения, недостаточных для ее продвижения (роста).

2. Разработаны и апробированы три признака АЭ наличия усталостной поврежденности материала элементов динамического оборудования при условии циклической активации движения берегов трещины. Первый признак АЭ — классификационный, в двумерном пространстве «Амплитуда—MARSE», а второй и третий — логические, основанные на отслеживании повторяемости проявления АЭ в каждом цикле нагружения. Для цапф сушильных цилиндров картоноделательной машины установлены и уточнены граничные значения всех предложенных признаков АЭ.

3. Разработанная методика АЭ ранжирования цапф сушильных цилиндров картоноделательной машины по степени усталостной поврежденности их материала позволила повысить производительность оценки их технического состояния по сравнению с УЗ способом минимум в два раза при сокращении объема применения других методов неразрушающего контроля (контроль только забракованных методом АЭ цапф). Экспериментальная оценка достоверности предложенной методики АЭ относительно УЗ метода показала вероятность обнаружения усталостной трещины на уровне 71 %, при вероятности их пропуска и перебраковки изделия 12 и 17 % соответственно. Считаем, что полученные результаты и предложенная методика вполне могут быть применены для АЭ-контроля и ранжирования по усталостной поврежденности материала элементов массивного динамического оборудования другого типа: цапфы и роторы кристаллизаторов, роторы паровых турбин, шнеки, роторы перемешивающих устройств и т.д. Однако последнее подразумевает обязательность уточнения граничных значений, установленных признаков АЭ усталостной поврежденности материала по каждому типу оборудования.

Авторы благодарят к.ф.-м.н. Линдерова Михаила Николаевича за помощь в проведении испытаний на рост усталостной трещины и тепловые измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коряковская Н.В., Бедердинова О.И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 188—204.
2. Ягуткин В.А., Илюшин В.В. Опыт восстановления цапф сушильных цилиндров методом наплавки // Леса России и хозяйство в них. 2013. № 1 (44). С. 195—198.
3. Сиваков В.П., Микушина В.Н. Диагностирование технического состояния сушильных цилиндров бумагоделательных машин по температуре // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. 8 с.
4. Сиваков В.П., Музыкантова В.И., Вихарев С.Н., Мишин С.А. Обоснование технического обслуживания оборудования целлюлозно-бумажного производства диагностированием // Известия вузов. Лесной журнал. 2009. № 3. С. 118—125.
5. Chen X., Wang S., Qiao B., Chen Q. Basic research on machinery fault diagnostics: Past, present, and future trends // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. No. 13. P. 264—291.
6. Kushwaha N., Patel V. N. Modelling and analysis of a cracked rotor: a review of the literature and its implications // Archive of Applied Mechanics. 2020. No. 90. P. 1215—1245.
7. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
8. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. 136 с.
9. Barat V., Marchenkov A., Ushanov S., Bardakov V., Elizarov S. Investigation of Acoustic Emission of Cracks in Rails under Loading Close to Operational // Applied Sciences. 2022. 12 (22). P.11670.
10. Carrasco A., Méndez F., Leaman F., Vicuña C. Short Review of the Use of Acoustic Emissions for Detection and Monitoring of Cracks // Acoustics Australia. 2021. No. 49. P. 273—280.
11. Keshtgar A., Sauerbrunn C. M., Modarres M. Structural Reliability Prediction Using Acoustic Emission-Based Modeling of Fatigue Crack Growth // Applied Sciences. 2018. No. 8. P. 1225.
12. Andreev K., Shetty N., Verstrynge E. Acoustic emission based damage limits and their correlation with fatigue resistance of refractory masonry // Construction and Building Materials. 2018. No. 165. P. 639—646.
13. Elizarov S.V., Barat V.A., Terentyev D.A., Kostenko P.P., Bardakov V.V., Alyakritsky A.L., Koltsov V.G., Trofimov P.N. Acoustic Emission Monitoring of Industrial Facilities under Static and Cyclic Loading // Applied Sciences. 2018. No. 8. P. 1228.
14. Ono K. Structural Health Monitoring of Large Structures Using Acoustic Emission — Case Histories // Applied Sciences. 2019. 9 (21). 4602.
15. Sheriff K.A.I., Hariharan V., Kumar B.M. Review on condition monitoring of rotating machines // International journal of scientific and technology research. 2020. 9 (2). P. 2343—2346.
16. Sayar H., Azadi M., Alizadeh M. Detection of Crack Initiation and Propagation in Aluminum Alloy Under Tensile Loading, Comparing Signals Acquired by Acoustic Emission and Vibration Sensors // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. P. 100.
17. Ibarra-Zarate D., Tamayo-Pazos O., Vallejo-Guevara A. Bearing fault diagnosis in rotating machinery based on cepstrum pre-whitening of vibration and acoustic emission // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. 104. P. 4155—4168.
18. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. М.: Изд-во стандартов, 1987. 128 с.
19. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Некоторые особенности сигналов акустической эмиссии от трения берегов трещин // Дефектоскопия. 1981. № 9. С. 6—10.
20. Lumb R., Wayne S., Qi G. Analysis of Fatigue Damage Information Obtained from Acoustic Emission Data // Data-Enabled Discovery and Applications. 2020. V. 4. P. 1.
21. Zhu X.-Y., Chen X.-D., Dai F. Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of the Bedrock of a Hydropower Station under Cyclic Triaxial Loading // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. No. 53. P. 5203—5221.
22. Carboni M., Crivelli D. An acoustic emission based structural health monitoring approach to damage development in solid railway axles // International Journal of Fatigue. 2020. V. 139. P. 105753.
23. Jiang P., Sun W., Li W., Wang H., Liu C. Extreme-Low-Speed Heavy Load Bearing Fault Diagnosis by Using Improved RepVGG and Acoustic Emission Signals // Sensors. 2023. V. 23. P. 3541.
24. Ma W., Shen H., Xu G. Study on cracks and process improvement for case hardened gear shaft straightening // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. V. 36 (6). P. 2861—2870.
25. Zhang X., Wang K., Wang Y., Shen Y., Hu H. Rail crack detection using acoustic emission technique by joint optimization noise clustering and time window feature detection // Applied Acoustics. 2020. V. 160. P. 107141.

26. Lazarev S., Mozgovoi A., Vinogradov A., Lazarev A., Shedov A. Electromagnetic method of elastic wave excitation for calibration of acoustic emission sensors and apparatus // *Journal of Acoustic Emission*. 2009. No. 27. P. 212—223.
27. Iziumova A.Y., Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Panteleev I.A., Mubassarova V.A., Plekhov O.A., Linderov M.L., Merson D.L., Vinogradov A.Yu. Heat dissipation and acoustic emission features of titanium alloys in cyclic deformation mode // *Acta Mechanica*. 2021. V. 232 (5). P. 1853—1861.
28. Bekher S.A., Popkov A.A. Applying impact loading for revealing cracks in glass by acoustic emission method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54 (11). P. 741—747.
29. Бехер С.А., Попков А.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22 (1). С. 62—71.
30. Chen Y., Gou B., Yuan B., Ding X., Sun J., Salje E.K.H. Multiple Avalanche Processes in Acoustic Emission Spectroscopy: Multibranching of the Energy-Amplitude Scaling // *Physica Status Solidi*. B. 2022. V. 259 (3). P. 2100465.
31. Kamel S.M., Samy N.M., Tóth L.Z., Daróczy L., Beke D.L. Denouement of the Energy-Amplitude and Size-Amplitude Enigma for Acoustic-Emission Investigations of Materials // *Materials*. 2022. V. 15. P. 4556.
32. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vinogradov A.Yu. A time-frequency based approach for acoustic emission assessment of sliding wear // *Lubricants*. 2020. V. 8. No. 5. P. 52.