

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-6-40-47>

## ФРАКТОДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, РАЗРУШИВШИХСЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА СЕВЕРЕ

© Софья Петровна Яковлева\*, Сусанна Николаевна Махарова

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, д. 1; \*e-mail: [spyakovleva@yandex.ru](mailto:spyakovleva@yandex.ru)

*Статья поступила 4 февраля 2020 г. Поступила после доработки 12 марта 2020 г.  
Принята к публикации 26 марта 2020 г.*

Фрактодиагностика аварийных разрушений позволяет получить данные, имеющие экспертную значимость, а также необходимые для разработки рекомендации по предотвращению аварий, повышения надежности и работоспособности изделий машиностроения и металлоконструкций в различных условиях эксплуатации. Цель работы — выявление методами фрактодиагностики причин преждевременного разрушения технических объектов, эксплуатирующихся в природно-климатических условиях Севера и являющихся источниками повышенной техногенной опасности — автомобильного газового баллона и ветроэнергетической установки. Методами металлографии и фрактографии с использованием основных положений металловедения, физики металлов, физики прочности и разрушения установлена локализация начальных трещин, выявлены микромеханизмы их образования и последующего развития, описана общая картина разрушения. Показано, что основные физико-механические причины разрушения баллона связаны с огрублением и неоднородностью распределения интерметаллидной фазы в материале металлической оболочки (лейнера) и с повышенной шероховатостью ее внутренней поверхности, что создало на ней систему микроконцентраторов напряжений. Причиной обрушения ветрогенератора послужили непровары в сварных соединениях опорной конструкции, на которых зародились начальные трещины. Основной механизм разрушения в обоих случаях — развивающаяся во времени усталость металла, инициированная технологическими микро- и макродефектами. Стадия окончательного разрушения баллона носила динамический характер и включала образование в лейнере системы вязких трещин, их слияние и последующую фрагментацию лейнера. В башне ветрогенератора достижение критической длины усталостной трещины обусловило наступление предельного состояния конструкции и ее последующее хрупкое разрушение. Приведенные примеры разрушений относятся к постепенным отказам, так как обусловлены не внешними причинами, а проявлением заложенных технологических дефектов. Результаты работы могут быть использованы для повышения работоспособности исследованных объектов, обеспечения безопасности их эксплуатации и разработки компенсирующих мероприятий.

**Ключевые слова:** газотопливный баллон; ветроэнергетическая установка; эксплуатационное разрушение; фрактография; технологические дефекты; усталостные трещины.

## FRACTOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF TECHNICAL OBJECTS FRACTURED WHEN OPERATING IN THE NORTH

© Sofia P. Yakovleva\*, Susanna N. Makharova

V. P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, ul. Oktyabrskaya 1, Yakutsk, 677980 Russia; \*e-mail: [spyakovleva@yandex.ru](mailto:spyakovleva@yandex.ru)

*Received February 4, 2020. Revised March 12, 2020. Accepted March 26, 2020.*

Fractographic diagnostics of accidental damage provides data of expert importance which can be used in developing recommendations regarding of accident prevention, improving the reliability and performance of mechanical engineering products and structures in various operating conditions. The goal of the study is fractographic diagnostics of the nature and causes of premature destruction of technical devices and facilities operating in climatic conditions of the North and being the sources of increased technogenic danger, i.e., an automobile gas cylinder and a wind power plant. Using the basic principles of metal science, metal physics, strength and fracture mechanics, the localization of initial cracks we revealed the micromechanisms of crack formation, localization and development and restored the general picture of the fracture. It is shown that the main physical and mechanical causes of the gas cylinder damage are associated with the coarsening and inhomogeneity of the intermetallic phase distribution in the material of the inner metal shell ("liner") and with the increased roughness of the internal surface which formed a sys-

tem of stress microconcentrators. The reason for the collapse of a wind generator was lack of penetration in welded joints of the support structure being the place of origin of the initial cracks. The main fracture mechanism in both cases is time-evolving process of the metal fatigue initiated by technological micro- and macro-defects. The stage of the final destruction of a gas cylinder exhibited a dynamic character realized through the formation of a system of viscous cracks in the liner with their subsequent merging and fragmentation of the liner. The attained critical level of the fatigue crack development caused the onset of the ultimate state of the structure of a wind generator tower resulted in subsequent brittle fracture. The described destructions relate to gradual failures as they are caused by inherent technological defects rather than by external impacts. The results of the study can be used to improve the performance of the considered objects, ensure their operational safety and promote developing of compensating measures.

**Keywords:** gas fuel cylinders; wind power plant; operational failure; fractography; technological defects; fatigue cracks.

## Введение

Несмотря на успехи проектирования, изготовления, диагностирования различных технических объектов, достаточно часто возникают их отказы, аварии и катастрофические разрушения. Для установления причин разрушения деталей машин и металлоконструкций применяют методы фрактодиагностики, включающие в себя комплекс исследований с использованием фрактографии, металлографии, рентгеноструктурного анализа, механических испытаний при учете общих закономерностей процессов деформации и разрушения металла на различных масштабных уровнях [1 – 4]. Изломы представляют собой результат нарушения сплошности материала, выявляют наиболее слабые места объекта, содержат информацию о природе, особенностях и причинах разрушения. Исследование причин, вызвавших повреждения и отказы деталей техники и металлоконструкций, позволяет не только выявить очаги, природу, последовательность процессов разрушения, но и создать научную основу для повышения проектных характеристик, совершенствования технологий изготовления и нормативных требований, обеспечения своевременной диагностики и определения остаточного ресурса. Так, присутствие в сварных металлоконструкциях технологических дефектов сварки с достаточно малыми радиусами (но превышающими радиус вершины концентратора, эквивалентного усталостной трещине) требует коррекции расчетов на прочность, так как существующие критерии механики разрушения справедливы для дефектов типа трещин. Поэтому для сварных металлоконструкций наряду с критериями распространения уже имеющихся трещин разрабатывают критерии их образования в элементарных объемах металла около технологических дефектов, в связи с чем необходимо изучение инициации микротрещин возле них.

Таким образом, исследование причин и развития процессов разрушения с учетом структуры материала, свойств и условий эксплуатации является актуальной задачей. Помимо экспертной значимости, получаемые данные важны для по-

вышения надежности и работоспособности изделий машиностроения в различных условиях эксплуатации, в том числе характерных для северных регионов [2, 5, 6].

Цель работы — выявление методами фрактодиагностики природы и причин преждевременного разрушения эксплуатировавшихся в природно-климатических условиях Севера технических объектов повышенной опасности — автомобильного газового баллона и башни ветроэнергетической установки.

## Объекты и методы исследования

В последнее время во многих странах приняты программы замещения моторных топлив компримированным природным газом как экономически эффективным и экологически безопасным видом топлива [7, 8]. Вместе с тем газотопливные баллоны (ГТБ) являются источником техногенной опасности с такими поражающими факторами, как тепловое излучение, открытое пламя, а также ударная воздушная волна и фрагменты металла при взрывном характере разгерметизации. В этой связи рассмотрим аварийное фрагментационное разрушение газотопливного баллона марки БА 100.20.327/1660, произошедшее в летнее время в гаражном боксе вскоре после заправки. Нарботка баллона составила менее четырех лет при расчетном сроке службы до 15 лет.

Другой объект исследования — ветроэнергетическая установка. Арктика и Крайний Север относятся к регионам, богатым ветровыми ресурсами, в связи с чем прогнозируется значительная роль ветроэнергетики на этих территориях. В рамках экспериментальной эксплуатации в арктическом поселке Тикси был смонтирован ветрогенератор ВЭУ-250 (уже имевший многолетнюю наработку). Приблизительно через восемь лет при температуре воздуха не ниже  $-17,8^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра 11 – 29 м/с произошло разрушение сварной опорной конструкции (башни) ветрогенератора, повлекшее его падение; общее время «жизни» технического устройства составило около 23 лет.



**Рис. 1.** Общий вид фрагментов разрушившегося лейнера: а, б — фрагменты нижней части; в — верхняя часть со стороны вентиля с сохранившейся композитной оболочкой

**Fig. 1.** General view of the damaged liner fragments: а, б — fragments of the lower part; в — upper part on the valve side of with preserved composite shell

На первой стадии исследований проводили визуальное обследование имеющихся фрагментов аварийных объектов в соответствии с общими стандартными рекомендациями. Цель визуального обследования — выявление особенностей макростроения изломов, общей картины разрушения конструкции, повреждений на внутренней и наружной поверхностях, определение участков вырезки образцов для дальнейшего изучения и проведения механических испытаний.

Для определения химического состава металла объектов использовали спектрометр Foundry-master UVR. Металлографические и фрактографические исследования проводили на оптических микроскопах Neofot-32, Axio Observer D1m, стереомикроскопах Альтами PCO745-T, Stemi 2000C, электронных растровых микроскопах JEOL JSM-6480LV, HITACHI-TM 3030. Микро-распределение химических элементов в структурных составляющих металла исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа при сканировании шлифа с помощью прибора JEOL JSM-6480LV (луч диаметром ~2 мкм, K $\alpha$ -излучение). Испытания на растяжение выполняли при комнатной температуре на испытательной машине Zwick/Roell Z600. Микротвердость измеряли микротвердомером ПМТ-3, твердости по Бринеллю — твердомером Heckert. Уровень шероховатости определяли профилометром SJ-201.

## Основные результаты и обсуждение

Разрушение баллона для автомобильного топливного газа. Конструктивно композитные ГТБ состоят из внутренней металлической оболочки (лейнера) и наружной стеклоэпоксидной оболочки. Силую стеклоэпоксидную оболочку получают последовательной намоткой нитей стеклоровинга, сформированных в ленту и пропитанных полимерным связующим. В соответствии с теорией двухслойных осесимметричных оболочек внутренняя металлическая и наружная стеклопластиковая оболочки газового баллона должны воспринимать нагрузку как единое целое, а в аварийных случаях — разрушаться одновременно, полностью реализуя совместную прочность. Исследованный баллон разорвало с отрывом днища лейнера со стороны заглушки, разделением днища на несколько частей и отделением наружной композитной оболочки (рис. 1).

Фрагменты лейнера сильно деформированы, при этом существенного утонения стенок не выявлено. На внутренней поверхности лейнера заметных коррозионных дефектов типа язвин и раковин не обнаружено. Наличие прочно прилегающей стеклопластиковой оболочки, как правило, исключает фрагментирование баллонов. В связи с этим фрагментационный тип разрыва баллона в исследуемом случае свидетельствует о потере прочности силовой оболочки и ее сцепления с металлической на момент окончательного разрушения.

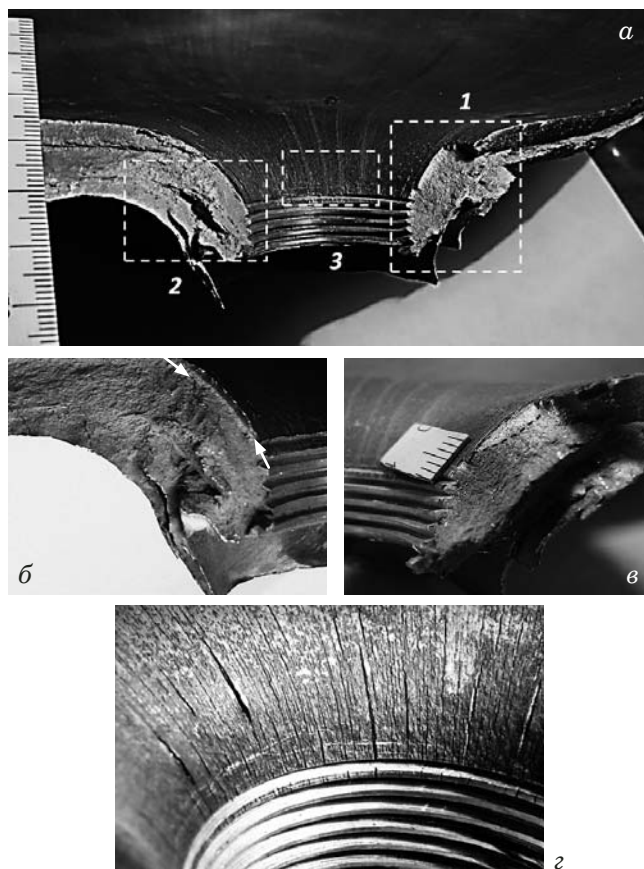
Механические свойства металла лейнера удовлетворяют заявленным в ТУ требованиям на деформируемый алюминиевый сплав АД 33, из которого он выполнен (образцы для испытаний на растяжение вырезали из зоны недеформированной обечайки). Предел текучести составил 281 МПа, предел прочности — 304 МПа, относительное удлинение — 14 %; по ТУ значения этих параметров должны быть не менее 266 МПа, 286 МПа, 12 % соответственно. Твердость металла недеформированных участков — 860 МПа; твердость разрушившегося днища оказалась пониженной — 838 МПа при заявленном в ТУ значении 864 МПа (необходимо отметить, что испытуемый металл претерпел определенные изменения структуры и свойств в процессе разрушения).

Макрофрактографические особенности излома позволили определить, что разрушение баллона началось от его внутренней поверхности со стороны заглушки (рис. 2, а). В зоне 1 хорошо заметна блестящая поверхность очаговой усталостной трещины (рис. 2, в). В зоне 2 очаговая трещина представляет собой узкую и также усталостно-притертую площадку (рис. 2, б). Важной особенностью внутренней поверхности фрагментов лейнера являются множественные меридио-

нальные трещины различных длины (до 19 мм) и степени раскрытия (до 0,47 мм), наиболее многочисленные вблизи резьбы горловины (рис. 2, *з*). Максимальная глубина их проникновения в металл ~1,1 мм.

Алюминиевые лайнеры композитных баллонов высокого давления из термически упрочняемых алюминиевых сплавов на основе системы Al – Mg – Si (авиалей) после изготовления (заковки) подвергали термической обработке (закалке и искусственному старению) в целях обеспечения требуемого уровня прочности [9 – 11]. В ходе нагрева под закалку происходит растворение упрочняющих избыточных фаз. При закалке эти фазы не успевают выделиться, в результате фиксируется пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в алюминии. При старении закаленного сплава в зависимости от температуры и продолжительности процесса в пересыщенном твердом растворе образуются участки, обогащенные легирующими элементами (зоны Гинье – Престона), и дисперсные продукты распада — частицы промежуточных метастабильных и стабильных фаз. Упрочнение сплава происходит благодаря образованию пересыщенного раствора при закалке и главным образом — при старении на стадиях образования зон Гинье – Престона и дисперсионного твердения (в авиалах основная упрочняющая фаза — выделения дисперсных частиц  $Mg_2Si$ ).

Сплав, из которого выполнен аварийный баллон, имел неоднородную структуру с укрупненными частицами упрочняющей интерметаллидной фазы (рис. 3, *а, б*, рис. 4). В разрушившемся днище эти недостатки структуры наиболее выражены (рис. 3, *б*). Укрупнение частиц привело к уменьшению их количества, увеличило расстояния между ними и способствовало снижению твердости. Хрупкость частиц интерметаллидов

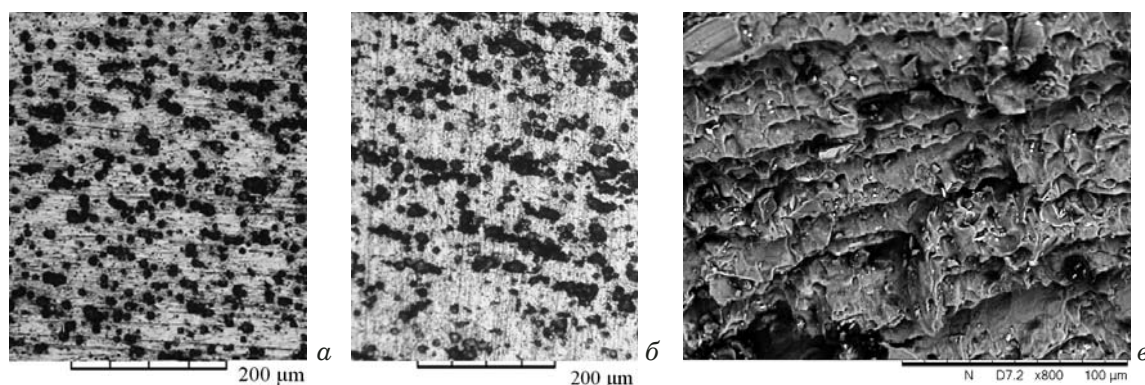


**Рис. 2.** Общий вид разрушившейся горловины (*а*) и увеличенные изображения участков излома 2 (*б*), 1 (*в*) и 3 (*г*); светлая полоса между стрелками (*б*) и светлая площадка, ограниченная пунктиром (*в*), — поверхности очаговых усталостных трещин

**Fig. 2.** General view of the damaged filler neck (*a*) and enlarged images of fracture zones 2 (*b*), 1 (*c*), and 3 (*d*); light strip between arrows (*b*) and light area marked by a dotted line (*c*) — surfaces of focal fatigue cracks

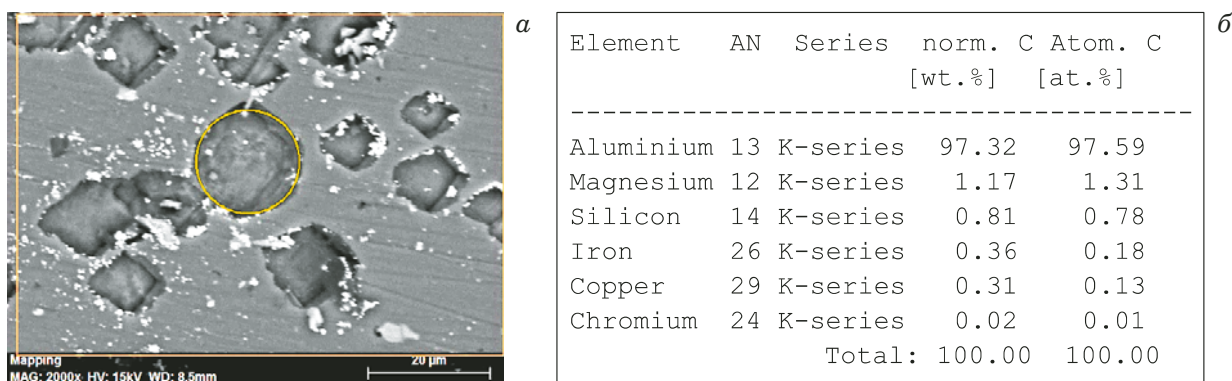
ухудшила сопротивление материала зарождению и распространению разрушения [12].

Усталостные трещины зародились на меридиональных трещинах внутренней поверхности



**Рис. 3.** Микроструктура металла разрушившегося ГТБ в неповрежденной цилиндрической части (*а*), в зоне днища (*б*) и микростроение очаговых усталостных трещин в зоне 1 на рис. 2, *а* (*в*)

**Fig. 3.** The microstructure of the metal of the gas cylinder in the undamaged cylindrical part (*a*), in the zone of bottom (*b*) and microstructure of focal fatigue cracks in zone 1 on fig. 2, *a* (*c*)



**Рис. 4.** Увеличенные изображения интерметаллидных частиц в материале дна разрушившегося ГТБ (а) и локальное содержание химических элементов в области, ограниченной окружностью, (б)

**Fig. 4.** Magnified images of the intermetallide particles from the bottom of the damaged gas cylinder (a) and local content of chemical elements in the circled area (b)

днища. Поверхность очаговых усталостных трещин имела характерное каскадное строение и содержала множество интерметаллидных частиц (рис. 3, в).

По результатам проведенных исследований основной физико-механической причиной разрушения лайнера баллона задолго до выработки расчетного ресурса является неудовлетворительная структура материала. Выделение упрочняющей фазы в виде конгломератов укрупненных хрупких частиц интерметаллидов, неравномерное их распределение со слабовыраженной строчечностью снизили значение твердости. Пониженная твердость материала обусловила повышенную шероховатость внутренней поверхности лайнера при закатке горловины, что создало на ней систему микроконцентраторов напряжений. В зоне горловины нижнего днища, на микроконцентраторах напряжений, под действием эксплуатационных нагрузок возникли первичные трещины в металле, уже ослабленном относительно крупными выделениями хрупких интерметаллидных фаз. В условиях малоциклового эксплуатационного нагружения на них были инициированы очаговые усталостные трещины. Поскольку усталость — процесс, развивающийся во времени, то разрушение баллона не явилось одномоментным, а имело две основных стадии. На первой происходили процессы зарождения и распространения усталостных трещин до момента, пока одна из них с опережающим развитием не достигла критической величины. Это перевело процесс в стадию окончательного разрушения, носившего динамический характер и реализовавшегося путем образования в лайнере системы вязких трещин, их слияния и последующей фрагментации лайнера. Момент начала лавинного разрушения баллона зависел от следующих факторов: способности металлического лайнера к пластической деформации без потери ее устойчивого характера, а также скорости деструкции и

нарастания неустойчивости внешней композитной оболочки, сдерживающей расширение лайнера, что обуславливало накопление упругой энергии во всей системе.

Уровень прочностных и пластических свойств металла лайнера, а также сдерживающее влияние стеклопластиковой внешней оболочки обеспечили достаточно длительный промежуток времени от появления усталостной трещины до развития критических местных деформаций в лайнере. Эти деформации передавались на наружную оболочку, обуславливая ее прогрессирующую деструкцию [13]. После потери функциональных свойств силовой оболочки металлический лайнер принял на себя всю нагрузку, начался этап его деформирования с неконтролируемой скоростью и последующей фрагментацией с высвобождением большого запаса накопленной упругой энергии. Очевидно также, что с наибольшей вероятностью баллон достигал критического состояния после дозаправки газом.

**Обрушение башни ветрогенератора.** Башня производства Германии выполнена из стальных листов в виде конической трубчатой конструкции, состоящей из трех секций (рис. 5). Ее основные габаритные размеры: высота 30 м; верхний и нижний диаметры — 1,2 и 2,5 м. Толщина стенки у основания средней секции 16 мм; здесь же имеется доступ в башню извне через люк, в зоне которого приварены ребра жесткости для усиления конструкции. Микроструктура металла средней секции ферритно-перлитная со средним размером зерна ~18 мкм (ближайший отечественный аналог этого металла — сталь 10). По результатам механических испытаний металл по прочности и ударной вязкости в целом соответствует требованиям, предъявляемым к стали 10: предел текучести — 264 МПа; предел прочности — 419 МПа; относительное удлинение — 34 %; ударная вязкость  $KCU^{-40} = 150$  Дж/см<sup>2</sup>. Согласно стандарту предел текучести стали 10

**Рис. 5.** Вид башни ветрогенератора с указанием места разрыва (отмечено пунктиром)

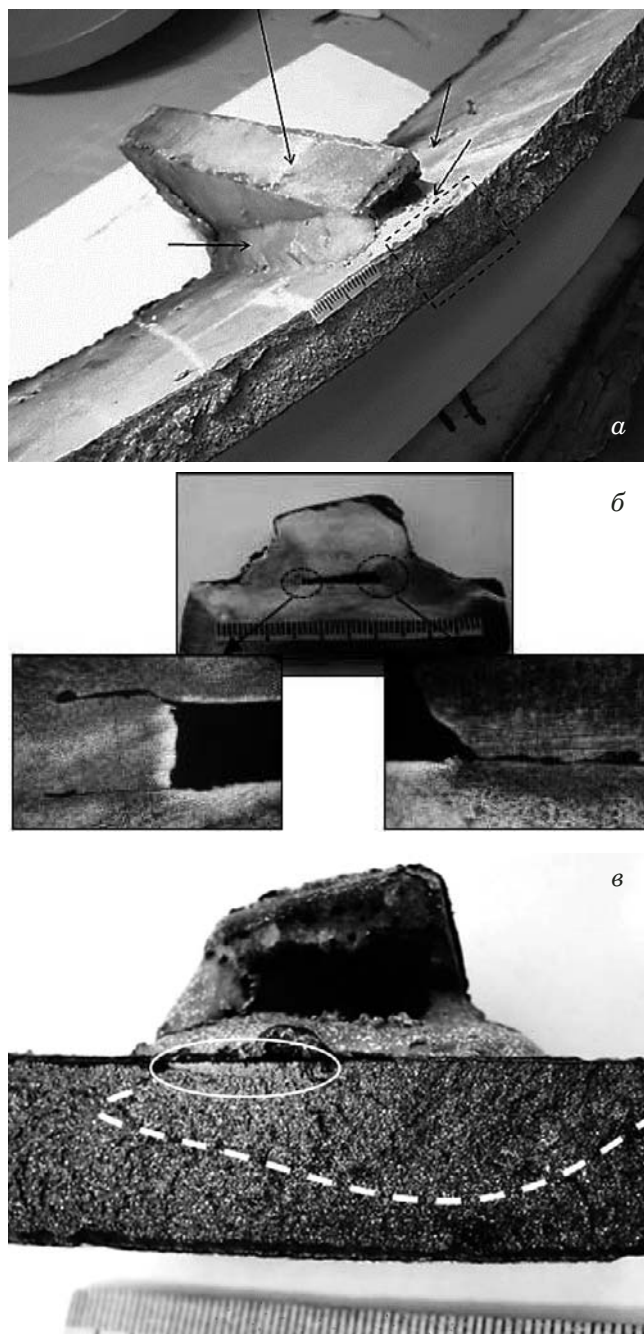
**Fig. 5.** Location of the break of a wind turbine tower (marked with a dotted line)



должен превышать 216 МПа, предел прочности — находиться в диапазоне 295 – 420 МПа, относительное удлинение — составлять не менее 32 %,  $KCU^{-40} = 157 - 179 \text{ Дж/см}^2$ .

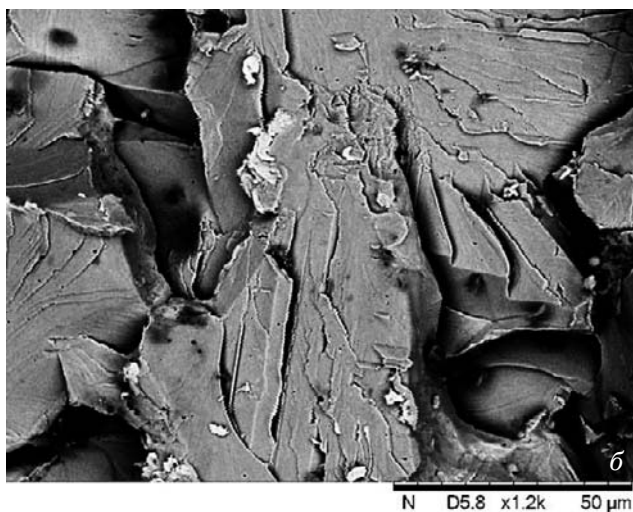
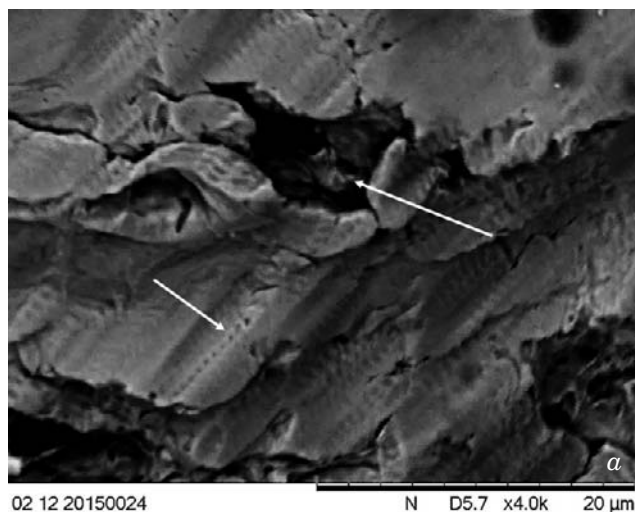
Вызвавший обрушение ветрогенератора излом проходил на расстоянии 5 – 10 мм от фланцевого соединения нижней и средней секций башни (см. рис. 5). Макрофрактографические особенности излома позволили определить, что начальное разрушение сформировалось у торцевой оконечности ребра жесткости люка (рис. 6, а). Проведена оценка качества выполнения сварного шва усиления (рис. 6, б). Двусторонний тавровый шов выполнен без скоса кромок. Конструктивный зазор неравномерен как по длине, так и в поперечном сечении. Согласно ГОСТ 16098–70 в двустороннем тавровом сварном соединении пластин толщиной 16 – 18 мм зазор не должен превышать 3 мм. Вблизи места зарождения очаговой трещины ширина раскрытия конструктивного непровара (зазора) между свариваемыми элементами достигает 4 мм, т.е. его величина выходит за пределы значений, допускаемых стандартом. Кроме того, по требованиям ГОСТ 16098–80 катет двустороннего таврового соединения для пластин толщиной 16 – 18 мм должен составлять не более 7 мм. Значения катетов левого сварного шва — 11 – 12 мм, что тоже не соответствует требованиям норматива. Считается, что внутренние трещины, как правило, начинаются от зазора между основным и привариваемым элементами, что подтверждает рис. 6, б — в корне сварных швов выявлены трещины, распространяющиеся от конструктивного непровара. В местах приварки усиления также были обнаружены наружные трещины, что дополнительно доказывает определяющее влияние ребра жесткости как концентратора напряжений, на котором было инициировано разрушение.

Поверхность очаговой трещины представляет собой узкую протяженную площадку размерами  $1,5 \times 16 \text{ мм}^2$  с несколько заглаженной поверхностью со слабым металлическим блеском, ориентированную перпендикулярно действию максимальных напряжений (рис. 6, в). Металличе-



**Рис. 6.** Участок с начальной зоной разрушения башни: а — поверхность излома с очаговой трещиной (выделена штриховым прямоугольником) у торца ребра жесткости (показано длинной стрелкой), приваренного к стенке башни (места сварки указаны короткими стрелками); б — развитие трещин от корня сварных соединений ребра жесткости и башни (поперечный шлиф ребра жесткости); в — очаговая трещина (в овале) и участок подрастания начальной трещины (ограничен пунктиром)

**Fig. 6.** The area with the initial zone of the tower destruction: а — fracture surface with a focal crack (indicated by a dashed rectangle) at the end of the strengthening rib (shown by a long arrow), welded to the wall of the tower (the sites of welding are indicated by short arrows); б — development of cracks from the root of welded joints of the strengthening rib and tower (transverse section of the strengthening rib); в — focal crack (in the oval) and the area of growth of the initial crack (circled by a dotted line)



**Рис. 7.** Микростроение поверхности начального разрушения (см. рис. 6, в): *a* — очаговая трещина (короткая стрелка указывает на траковые следы, длинная — на вторичные трещины); *b* — зона перехода очаговой трещины к ускоренному развитию

**Fig. 7.** The microstructure of the initial fracture surface (see Fig. 6c): *a* — focal crack (short arrow indicates track-shaped marks, long arrow indicates secondary cracks); *b* — microstructure of the transient zone wherein the focal cracks rush to accelerated development

ский блеск и вторичные трещины обусловлены притиранием берегов и высоким уровнем нагрузок. При изучении ее микростроения для выявления природы очагового разрушения обнаружили признаки, свойственные трещинам малоциклового усталости [14], такие как «траковые» вмятины (рис. 7, *a*). В пользу малоциклового характера усталостного разрушения свидетельствуют микрофрактографические детали зоны дальнейшего продвижения очаговой трещины (выделена как область подрастания начальной трещины на рис. 6, в). Как и свойственно зонам ускоренного развития трещин малоциклового усталости [12, 14], в строении этой области обнаружены элементы микрорельефа, характерные для разрушения при статическом нагружении. В данном случае это фасетки хрупкого разрушения в виде лепесткообразных сколов с различной пространственной ориентацией (рис. 7, *b*).

Действительно, опорные системы ветротурбинных установок подвергаются циклическому аэродинамическому и механическому нагружениям, в том числе вибрационному, испытывают воздействие значительных крутящих и изгибающих статических и динамических сил, часто имеющих импульсный характер (при порывах ветра). Характер дальнейшего развития процесса разрушения башни ветрогенератора, происшедшего с периодическими остановками и с переменной скоростью, также был обусловлен спецификой приложения нагрузок: сложными условиями и непостоянным характером нагружения. Возникающие напряжения являлись достаточно высокими для окончательного разрушения, но длительность их приложения была непродолжи-

тельна. Кроме того, торможению трещин способствовал хороший уровень пластичности металла. В связи с действием этих факторов магистральные трещины продвигались скачками; долом наступил тогда, когда уровень и время приложения нагрузки оказались достаточны для окончательного разделения оставшегося живого сечения конструкции.

Таким образом, разрушение башни ветроустановки было инициировано в сварных соединениях ребра жесткости, которые ограничили упругую податливость стенки и создали зону локализации напряжений, усугубленную неблагоприятной геометрией профиля таврового сварного шва. Формирование и развитие начальной трещины у торца ребра жесткости произошло по механизму малоциклового усталости, что указывает на периодическое возникновение состояний перегрузки, обусловленных как концентрацией напряжений, так и сложными температурно-силовыми условиями эксплуатации. Основная физико-механическая причина обрушения ветрогенератора — потеря несущей способности башни при достижении критической длины усталостной трещиной в результате длительного действия эксплуатационных нагрузок, что обусловило наступление предельного состояния конструкции с ее последующим хрупким разрушением.

## Заключение

Показано, что отказы технических изделий, их элементов и деталей обусловлены в основном двумя факторами — неправильными методами эксплуатации и погрешностями технологических процессов изготовления. Исследованные случаи

аварийных разрушений были инициированы технологическими микро- и макродефектами. Основные причины катастрофического разрушения автомобильного газового баллона связаны с огрублением и неоднородностью распределения интерметаллидной фазы в алюминиевом сплаве, из которого изготовлен лейнер. В результате технологическая операция закатки сопровождалась повышением шероховатости внутренней поверхности лейнера, что создало на ней систему микронеконцентраторов напряжений, обусловивших появление начальных меридиональных трещин, трещин усталости и преждевременное фрагментационное разрушение. Обрушение ветрогенератора началось от непроваров, являющихся одними из наиболее опасных и распространенных технологических дефектов сварки, стимулирующих зарождение трещин. Ввиду неизбежности сварочных дефектов основной и очевидный вывод относится к важности проведения тщательной технической инспекции сварных швов (в том числе кажущихся второстепенными) как на стадии изготовления, так и при эксплуатации конструкций. Выявление природы начальных трещин позволяет обоснованно подойти к определению ресурса башен ветрогенераторов по критерию зарождения трещины при малоцикловых нагрузках.

Приведенные примеры разрушений относятся к постепенным отказам, так как обусловлены проявлением заложенных технологических дефектов. Рассмотренные случаи аварий подтверждают, что основой обеспечения надежности и безопасности различных объектов машиностроения является, прежде всего, организация технологического и технического контроля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
2. Гордеева Т. А., Жегина И. П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 200 с.
3. McEvily A. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. — New-York: John Wiley & Sons, 2002. — 336 p.
4. McCullough R. R., Jordona J. B., Allison P. G., et al. Fatigue crack nucleation and small crack growth in an extruded 6061 aluminum alloy / *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 119. P. 52 – 61.
5. Махутов Н. А., Матвиенко Ю. Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин / *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. № 3. С. 80 – 89.
6. Лыглаев А. В., Большаков А. М. Хладостойкость (метод инженерной оценки). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 195 с.
7. Чикишев Е. М. Экономические и экологические аспекты эксплуатации транспортных средств на компримированном природном газе и бензине в условиях низких температур воздуха / *Автотранспортное предприятие*. 2010. № 1. С. 43 – 45.
8. Khan M. I., Yasmin T., Shakoор A. International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel / *Energy Systems*. 2015. N 6(4). P. 507 – 531. DOI: 10.1007/s12667-015-0152-x.
9. Ozturk F., Sisman A., Toros S., Kilic S., Picu R. C. Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy / *Materials and Design*. 2010. N 31. P. 972 – 975.
10. Marioara M., Nordmark H., Andersen S. J., Holmestad R. Post-b phases and their influence on microstructure ad hardness in 6xxx Al – Mg – Si alloys / *J. Mater Sci*. 2006. N 41. P. 471 – 478.
11. Demir H., Gunduz S. The effects of aging on machinability of 6061 aluminum alloy / *Mater Des*. 2009. N 30. P. 1480 – 1483.
12. Murakami Y. Metal fatigue: effects of small defects and non-metallic inclusions. — Oxford: Elsevier, 2002. — 369 p.
13. Bunsell A. R., Barbier F., Thionnet A., Zejli H., Besançon B. Damage Accumulation and Lifetime Prediction of Carbon Fiber Composite Pressure Vessels / *Proc. of the ASME Conf. on Pressure Vessels & Piping Division*. Vol. 6. Parts A and B. — Washington, USA, 2010. P. 303 – 310. DOI: 10.1115/PVP2010-25978.
14. РД 50-672-88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. Государственный комитет СССР по стандартам. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 22 с.

## REFERENCES

1. Botvina L. R. Destruction: Kinetics, Mechanisms, Common Pattern. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
2. Gordeeva T. A., Zhagina I. P. Analysis of damages in estimating the materials reliability. — Moscow: Mashinostroenie, 1978. — 200 p. [in Russian].
3. McEvily A. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. — New-York: John Wiley & Sons, 2002. — 336 p.
4. McCullough R. R., Jordona J. B., Allison P. G., et al. Fatigue crack nucleation and small crack growth in an extruded 6061 aluminum alloy / *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 119. P. 52 – 61.
5. Makhutov N. A., Matvienko Yu. G. Modeling and fracture criteria in current problems of strength, survivability and machine safety / *Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin*. 2014. N 3. P. 80 – 89 [in Russian].
6. Lyglayev A. V., Bolshakov A. M. Cold resistance (engineering assessment method). — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2011. — 195 p. [in Russian].
7. Chikishev E. M. Economic and environmental aspects of the operation of compressed natural gas and gasoline vehicles at low air temperatures / *Avtotransp. Predpr*. 2010. N 1. P. 43 – 45 [in Russian].
8. Khan M. I., Yasmin T., Shakoор A. International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel / *Energy Systems*. 2015. N 6(4). P. 507 – 531. DOI: 10.1007/s12667-015-0152-x.
9. Ozturk F., Sisman A., Toros S., Kilic S., Picu R. C. Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy / *Materials and Design*. 2010. N 31. P. 972 – 975.
10. Marioara M., Nordmark H., Andersen S. J., Holmestad R. Post-b phases and their influence on microstructure ad hardness in 6xxx Al – Mg – Si alloys / *J. Mater Sci*. 2006. N 41. P. 471 – 478.
11. Demir H., Gunduz S. The effects of aging on machinability of 6061 aluminum alloy / *Mater Des*. 2009. N 30. P. 1480 – 1483.
12. Murakami Y. Metal fatigue: effects of small defects and non-metallic inclusions. — Oxford: Elsevier, 2002. — 369 p.
13. Bunsell A. R., Barbier F., Thionnet A., Zejli H., Besançon B. Damage Accumulation and Lifetime Prediction of Carbon Fiber Composite Pressure Vessels / *Proc. of the ASME Conf. on Pressure Vessels & Piping Division*. Vol. 6. Parts A and B. — Washington, USA, 2010. P. 303 – 310. DOI: 10.1115/PVP2010-25978.
14. RD 50-672-88. Methodical instructions. Calculations and strength tests. Classification of metal fracture types. USSR State Committee for Standards. — Moscow: Izd. standartov, 1989. — 22 p. [in Russian].