ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54418.23— 2019 (МЭК 61400-23:2014)

Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 23

Полномасштабные испытания лопастей ротора на прочность

(IEC 61400-23:2014, Wind turbines — Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades, MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Фондом инфраструктурных и образовательных программ (Группа РОСНАНО) и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ВНИИНМАШ) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 марта 2019 г. № 116-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 61400-23:2014 «Ветроэнергетические установки. Часть 23. Полномасштабные испытания лопастей ротора на прочность» (IEC 61400-23:2014 «Wind turbines — Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades», MOD) путем внесения технических отклонений, объяснение которых приведено во введении к настоящему стандарту.

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте, приведены в дополнительном приложении ДА.

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта приведено в дополнительном приложении ДБ

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

6 Некоторые элементы настоящего стандарта могут быть объектами патентных прав. Международная электротехническая комиссия (МЭК) не несет ответственности за установление подлинности каких-либо или всех таких патентных прав

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и обозначения 2
4 Системы координат 3
5 Общие принципы 5
6 Документация и процедуры испытаний 6
7 Программа и планы испытаний 6
8 Коэффициенты нагрузки 7
9 Определение испытательной нагрузки 9
10 Испытания 11
11 Оценка результатов 13
12 Требования к протоколам 14
Приложение А (справочное) Руководящие принципы необходимости повторения статического испытания и испытания на усталость 15
Приложение В (справочное) Области испытаний 16
Приложение С (справочное) Определение испытательной нагрузки 17
Приложение D (справочное) Определение числа циклов нагрузки при испытании на усталость 22
Приложение Е (справочное) Различие между расчетной и испытательной нагрузками 25
Приложение F (справочное) Влияние больших прогибов и направления нагрузки 27
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 28
Приложение ДБ (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта 29

Введение

Лопасти ротора ветроэнергетической установки рассматривают как один из наиболее критических компонентов системы. В настоящем стандарте определены требования прочностных полномасштабных испытаний, связанных с подтверждением соответствия лопастей, а также интерпретация и оценка результатов.

Особые методы или настройки испытания не требуются или они включены в методы полномасштабного испытания лопастей.

Требования к испытаниям по определению параметров и характеристик лопастей включены в настоящий стандарт с целью подтверждения некоторых жизненно важных предположений, вносимых на стадии проекта и применяемых в качестве исходных параметров для расчета проектных нагрузок.

Любые требования стандарта могут быть заменены иными, если будет достоверно подтверждена безопасность системы.

Модификация настоящего стандарта по отношению к международному стандарту МЭК 61400-23:2014 осуществлена путем внесения следующих технических отклонений:

- исключены термины и обозначения, не примененные в тексте МЭК 61400-23:2014;
- исключены греческие символы (4.2) и обозначения индексов (4.3) в связи с тем, что пояснения к ним приведены в соответствующих пунктах стандарта;
- термины приведены в алфавитном порядке в соответствии с требованиями ГОСТ 1.5—2001;
- приложения приведены в порядке ссылок на них в тексте стандарта в соответствии с требованиями ГОСТ 1.5–2001;
- из приложения F исключена таблица F.1, повторяющая таблицу 1, приведенную в пункте 8.3.2;
- элемент «Библиография» исключен в связи с отменой IEC 61400-22:2010 «Ветроэнергетические установки. Часть 22. Испытание на соответствие и сертификация».

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 23

Полномасштабные испытания лопастей ротора на прочность

Renewable power engineering. Wind power engineering. Wind turbines.
Part 23. Full-scale structural testing of rotor blades

Дата введения — 2019—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования к условиям и проведению полномасштабных испытаний лопастей ротора на прочность ветроэнергетических установок (далее — установки), обработке и оценке полученных результатов. Основной аспект испытаний связан с оценкой целостности лопасти.

Настоящий стандарт устанавливает следующие виды испытаний: статические, на усталость, статические после испытания на усталость и испытания, определяющие другие параметры и характеристики лопастей, подтверждающие с приемлемым уровнем достоверности, что все лопасти данного типа соответствуют заданным требованиям.

Требования, необходимые для определения параметров испытаний лопастей, — по ГОСТ Р 54418.1. Испытательные нагрузки рассчитывают в зависимости от материала лопастей.

Настоящий стандарт не распространяется на оценку расчетных нагрузок по отношению к фактическим нагрузкам на установки.

В настоящем стандарте рассмотрены полномасштабные испытания лопастей горизонтально-осевых установок, изготовленных из композиционных материалов, тем не менее значительная часть требований стандарта применима к любым конфигурациям, размерам и материалам лопастей.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ ИСО/МЭК 17025 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

ГОСТ Р 54418.1 (МЭК 61400-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования

ГОСТ Р 55589 (МЭК 60050-415:1999) Международный электротехнический словарь. Часть 415. Установки ветроэнергетические. Системы генерирования электроэнергии

ГОСТ Р ИСО 2394 Конструкции строительные. Основные принципы надежности

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт,

Издание официальное

на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и обозначения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 55589, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **деформация:** Изменение геометрических размеров и/или формы образца под действием нагрузки.

3.1.2 **диапазон нагрузки:** Значения максимальных расчетных нагрузок во всех направлениях и положениях лопасти.

3.1.3 **жесткость:** Отношение прилагаемой нагрузки к вызываемой ею деформации упругого тела.

3.1.4 **испытание на усталость:** Испытание, при котором к образцу прилагают нагрузку с постоянной или циклической амплитудой.

3.1.5 **испытательная нагрузка:** Нагрузка при испытании.

3.1.6 **испытуемая область:** Область испытуемого объекта, к которой приложена заданная нагрузка.

3.1.7 **комель лопасти:** Часть лопасти, служащая для соединения лопасти со ступицей главного вала.

3.1.8 **кручение:** Изменение формы лопасти, характеризующееся поворотом поперечного сечения вокруг продольной оси.

3.1.9 **нагрузка с переменной амплитудой:** Нагрузка с переменным значением и/или цикличностью диапазона.

3.1.10 **накопленная усталость:** Процесс постепенного накопления повреждений под действием прилагаемой нагрузки.

3.1.11 **направление в плоскости:** Направление, перпендикулярное к локальной хорде и поперечной оси лопасти.

3.1.12 **направление к кромке:** Направление, параллельное локальной хорде.

Примечание — Направление к кромке представлено на рисунке 1.

3.1.13 **направление от лопасти:** Направление, перпендикулярное к оси несущей поверхности недеформированной лопасти.

Примечание — Направление к кромке представлено на рисунке 2.

3.1.14 **направление по размаху:** Направление, параллельное продольной оси лопасти.

3.1.15 **оснастка:** Деталь или устройство для приложения нагрузки или крепления образца.

3.1.16 **ось упругости:** Линия по длине лопасти, вдоль которой прилагают поперечные нагрузки, создающие только изгиб без создания крутящего момента в какой-либо части лопасти.

Примечание — Обычно осью упругости считают линию, проходящую через центр упругости каждой секции. Это определение неприменимо для лопастей с поворотно-изгибной муфтой.

3.1.17 **подсистема лопасти:** Интегрированная система элементов, выполняющих определенные функции в конструкции лопасти (например, система защиты от возгорания, аэродинамическая система торможения, подсистема контроля, подсистема аэродинамического управления и т. д.).

3.1.18 **полномасштабное испытание:** Испытание реальной лопасти или ее части.

3.1.19 **постоянная амплитуда нагрузки:** Циклическая нагрузка с заданной постоянной амплитудой (или средним значением) при испытании на усталость.

3.1.20 **предварительный изгиб:** Кривизна в направлении от плоскости лопасти в ненагруженном состоянии.

3.1.21 **привод:** Устройство управления постоянной или переменной нагрузкой и перемещением.

3.1.22 **продольный изгиб:** Нестабильность, характеризуемая нелинейным увеличением прогиба плоскости лопасти с изменением сжимающей нагрузки.

3.1.23 **расчетная нагрузка:** Выдерживаемая лопастью нагрузка с учетом частных коэффициентов безопасности.

3.1.24 **смещение лопасти:** Смещение в направлении, параллельном плоскости несущей поверхности и перпендикулярном к продольной оси недеформированной лопасти.

Примечание — Смещение лопасти представлено на рисунке 2.

3.1.25 **собственная частота:** Частота собственных колебаний упругой системы после начального возмущения.

3.1.26 **статическое испытание:** Испытание с приложением одного цикла нагрузки без проявления динамических эффектов.

3.1.27 **стреловидность:** Кривизна лопасти в плоскости смещения лопасти в ненагруженном состоянии.

3.1.28 **хорда:** Отрезок прямой, соединяющий переднюю и заднюю кромки лопасти и лежащий в рассматриваемом сечении.

3.1.29 **целевая нагрузка:** Расчетная нагрузка, являющаяся наилучшей в качестве испытательной.

3.1.30 **частные коэффициенты безопасности:** Коэффициенты, применяемые к нагрузкам и сопротивлению материала, для расчета погрешности измеренных величин.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

F_a — усилие сдвига в плоскости (координаты хорды);

F_b — усилие сдвига к кромке (координаты хорды);

F_c — усилие сдвига по размаху (координаты хорды);

F_x — усилие сдвига от лопасти (координаты главного вала);

F_y — усилие сдвига опережения-запаздывания (координаты главного вала);

F_z — усилие сдвига по размаху (координаты главного вала);

M_a — крутящий момент к кромке (координаты хорды);

M_b — крутящий момент в плоскости (координаты хорды);

M_c — торсионный момент лопасти (координаты хорды);

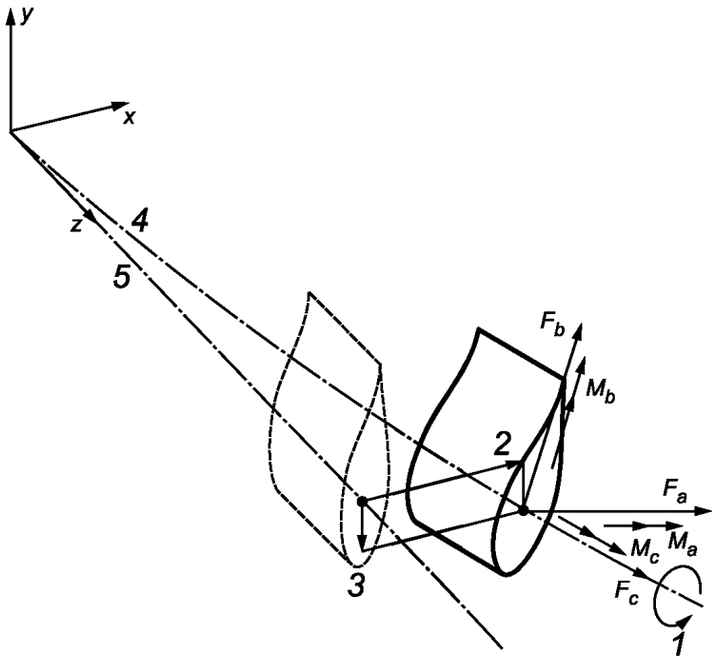
M_x — крутящий момент опережения-запаздывания (координаты главного вала);

M_y — крутящий момент от лопасти (координаты главного вала);

M_z — торсионный момент лопасти (координаты главного вала).

4 Системы координат

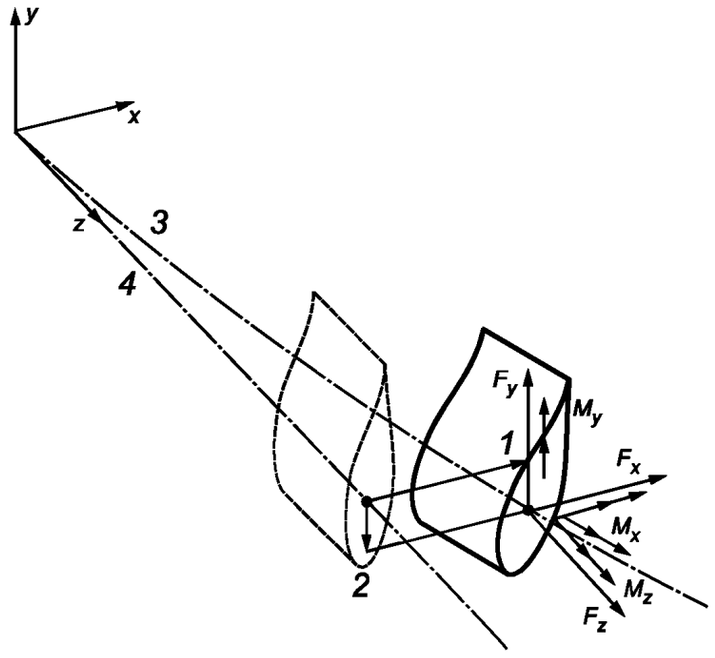
Во время прочностных испытаний применяют две различные системы координат. Система координат, связанная с направлением локальной хорды лопасти, приведена на рисунке 1. Система координат, связанная с общим направлением плоскости главного вала, приведена на рисунке 2.



1 — торсионный угол; *2* — смещение лопасти; *3* — смещение опережения-запаздывания, *4* — деформированная ось лопасти; *5* — недеформированная ось лопасти

Рисунок 1 — Система координат хорды лопасти (в плоскости, к кромке)

Примечание — Рисунок 1 дает представление о воздействии нагрузок вдоль и перпендикулярно к локальной хорде лопасти.



1 — смещение в направлении, перпендикулярном к оси несущей поверхности недеформированной лопасти; *2* — смещение в направлении, параллельном плоскости несущей поверхности и перпендикулярном к продольной оси недеформированной лопасти; *3* — деформированная ось лопасти; *4* — недеформированная ось лопасти

Рисунок 2 — Система координат главного вала

Примечание — Рисунок 2 дает представление о воздействии нагрузок вдоль плоскости главного вала.

5 Общие принципы

5.1 Цель испытания

Цель испытания лопасти заключается в подтверждении с достаточным уровнем достоверности того, что тип лопасти, изготовленной в соответствии с определенными требованиями, соответствует заданной надежности в конкретных граничных условиях, лопасть сохраняет способность выдерживать нагрузки, а срок службы соответствует расчетному значению.

При испытаниях определяют параметры и характеристики лопасти в целях подтверждения основных расчетных предположений, вносимых на стадии проекта и примененных в качестве исходных данных при расчете проектируемой нагрузки. Испытания лопасти охватывают не все расчетные предположения.

Полномасштабные испытания выполняют одновременно со стандартными испытаниями на ограниченном числе образцов (испытывают только одну или две лопасти проектируемого типа), по результатам которых невозможно получить достоверную информацию о качестве производства лопастей. Указанные испытания дают возможность получить достоверную информацию о типе лопасти, но не могут заменить детальный процесс разработки или систему контроля качества серийного производства. В приведенных в стандарте испытаниях не предусмотрены испытания функционирования механизма, базовой прочности материалов, а также получение данных для проектирования лопастей и/или компонентов.

5.2 Предельные состояния

Базой для задания испытательных нагрузок является весь комплекс проектных нагрузок на лопасти по ГОСТ Р 54418.1 с учетом принципов надежности по ГОСТ Р ИСО 2394, определяющих предельные состояния и частные коэффициенты, которые применяют для достижения соответствующих проектных значений. Пограничное состояние — это состояние прочности и нагрузки, влияющей на нее, за которым прочность более не соответствует проектным требованиям. Частный коэффициент отражает погрешность и выбран как минимум из принципа необходимости соблюдения вероятности достижения уровня ниже предельных значений прочности. Лопасть подвергают испытанию, если предельное состояние не достигнуто при воздействии на нее испытательной нагрузки, соответствующей проектной нагрузке.

Заданная испытательная нагрузка может превышать проектную для учета случайных воздействий, например влияния окружающей среды, погрешности испытания и отклонений при изготовлении лопасти (см. раздел 8).

5.3 Практические ограничения

При проведении испытания учитывают множество ограничений технического и экономического характера. Некоторые наиболее важные приведены ниже:

- распределение нагрузки на лопасть может быть смоделировано только приблизительно;
- как правило, проводят не более одного испытания;
- допускается испытывать одну или несколько лопастей;
- некоторые ошибки трудно определить.

В связи с тем, что ограничения влияют на окончательные результаты оценки предельных состояний, результат испытания может быть неоднозначным. При интерпретации результатов следует учитывать, что лопасть для испытания будет одной из первых в серийном производстве, что предполагает последующую модификацию. Любые незначительные модификации могут исказить достоверность результатов испытаний (см. приложение А).

5.4 Результаты испытаний

Проектная нагрузка является базой для задания испытательной нагрузки. Согласно проектной документации лопасть должна выдерживать расчетную нагрузку. В расчет нагрузки косвенно закладывают ряд допущений:

- усилие или напряжение рассчитано корректно;
- прочность и сопротивление усталости взаимосвязанных материалов и деталей оценены с достаточной точностью;

- значения прочности и сопротивления усталости, использованные для расчета, точны;
- технология изготовления соответствует проектной документации.

При полномасштабном испытании используют последние сверенные проектные данные, одновременно проверяют достоверность указанных выше допущений. Если лопасть не выдержала испытание, то по крайней мере одно из этих допущений нарушено и без дальнейшего анализа невозможно определить, что вызвало неожиданный сбой.

Если лопасть не повреждена во время испытания, а прочность лопасти и испытательные нагрузки определены корректно, она соответствует заложенным требованиям. Результаты испытания лопасти дают возможность проверить некоторые проектные допущения.

6 Документация и процедуры испытаний

Изготовитель должен задокументировать отслеживаемые данные о проектируемой конструкции лопасти. Документация должна включать в себя следующее:

- уникальный идентификатор лопасти;
- необходимые чертежи и спецификации;
- схему лопасти и рабочие инструкции;
- список изготовителей, тип и идентификационный номер для всех использованных материалов;
- сертификаты поставщика и протоколы лабораторных испытаний на все необходимые материалы, использованные изготовителем лопасти;
- термограммы отверждения для термореактивных смол и адгезивов на критических участках;
- дифференциальную сканирующую калориметрию или другой контроль отверждения;
- листы записи качества от изготовителя, подписанные ответственными лицами;
- весовой и балансировочный отчет, детализирующий общую массу и центр тяжести);

Примечание — Этот отчет должен содержать информацию обо всех незакрепленных элементах, зафиксированных во время взвешивания (например, соединяющие с комелем элементы и демпфер жидкостей);

- отчеты отклонений при изготовлении.

Ремонтные работы также должны быть задокументированы. Записи должны включать в себя вышеприведенный перечень.

Ремонтные работы могут быть выполнены:

- для устранения производственных дефектов и сервисных повреждений типовых образцов, предназначенных для испытания;
- из-за повреждений, вызванных испытательными нагрузками, превышавшими целевые нагрузки (см. 9.3 и 9.4).

Для испытания могут быть представлены специальные модификации лопастей. В течение испытаний на усталость нагрузки могут быть изменены для завершения испытания в приемлемый промежуток времени. В отдельных случаях необходимое увеличение усталостной нагрузки может привести к сбою в областях, которые не предполагалось испытывать. В этом случае могут быть применены специальные изменения лопасти. Изменение может быть вызвано необходимостью усилений нагрузки. Все специальные изменения лопасти документируют.

7 Программа и планы испытаний

7.1 Все критические области лопасти должны быть нагружены наиболее близко к области целевых нагрузок (см. приложение В). Испытание на смещение лопасти может быть достаточным, но их результаты необходимо оценивать (см. приложение С).

7.2 Программа испытания типа лопасти должна состоять как минимум из следующих испытаний и включать в себя:

- определение массы, центра тяжести и собственной частоты (см. 10.4.1 и 10.4.2);
- статические испытания (см. 9.3 и 10.2);
- испытания на усталость (см. 9.4 и 10.3);
- статические испытания после испытания на усталость.

Может потребоваться определение других свойств лопасти (см. 10.4.3).

Все испытания в заданном направлении и заданной области лопасти выполняют на одной и той же части лопасти. Испытания на смещение допускается проводить на двух отдельных лопастях. Тем

не менее если область лопасти критична из-за комбинации нагрузок, то на лопасти должна быть проведена вся последовательность испытаний.

Программа испытаний должна включать в себя проверку лопасти (см. раздел 10).

7.3 План испытаний

7.3.1 План испытания подготавливают для каждого испытания программы. План должен включать в себя описание лопасти, спецификацию нагрузок, условия проведения испытания и оборудование, применяемое при испытании.

7.3.2 Описание лопасти должно быть достаточным, чтобы быть уверенным в том, что испытательный стенд подходит для лопасти и исключены случайные перегрузки во время хранения, обработки, подъема, монтажа и испытаний в лаборатории.

Должна быть обеспечена следующая информация о лопасти:

- геометрия лопасти (предпочтительно в виде чертежа):
  длина лопасти;
  предварительный изгиб или стреловидность;
- масса и центр тяжести;
- состояние поверхности лопасти;
- монтажные детали лопасти:
  параметры болта (включая допуски) и размер стыка;
  размер болта, тип и класс;
  поверхность прижима болта;
  требование к болту или момент затягивания;
- процедура подъема и кантования;
- значение максимального ожидаемого прогиба под нагрузкой;
- геометрия профиля в точках приложения нагрузки.

В зависимости от особенностей испытания может потребоваться дополнительная информация (например, жесткость монтажа конструкции).

7.3.3 План испытания должен включать в себя значения целевых и испытательных нагрузок, описание применяемых методов и последовательность проведения испытаний. Условия окружающей среды, которые могут повлиять на результат испытания, также должны быть отражены в плане испытания (см. 8.3.3).

7.3.4 В плане испытания необходимо описать положение и ориентацию ячеек нагрузки, тензометрического датчика, датчика прогиба и других датчиков.

8 Коэффициенты нагрузки

8.1 При испытании следует принимать во внимание различные коэффициенты нагрузки. Коэффициенты нагрузки, применяемые при проектировании, — по 8.2, а коэффициент испытательной нагрузки, учитывающий методологию испытаний, — по 8.3.

8.2 Частные коэффициенты, применяемые при проектировании

8.2.1 В проектные расчеты должны быть включены частные коэффициенты по ГОСТ Р 54418.1:

γ_m — коэффициент материала;

γ_n — коэффициент последствий отказа;

γ_f — коэффициент нагрузки.

В проектных расчетах применяют все три частных коэффициента (γ_m, γ_n и γ_f). Результат их применения имеет большое значение, поскольку обеспечивает общий уровень безопасности проектируемой лопасти. На значение испытательной нагрузки будут влиять только γ_n и γ_f по причинам, указанным в 8.2.3, 8.2.4, 8.4.

8.2.2 Данные о материале, как правило, основаны на испытаниях образцов в лабораторных условиях.

Частный коэффициент для материала учитывает разницу между свойствами материала в конструкции и условиями, для которых были определены прочность и накопленная усталость. Например, он учитывает размерный фактор, влияние старения, температуры, влажности.

Частные коэффициенты материалов γ_m применяют при проектировании для учета возможных неблагоприятных отклонений свойств материала от установленных значений. Испытательные нагрузки не

должны увеличиваться за счет частного коэффициента γ_m, так как материал лопасти испытывают как реальный материал.

8.2.3 Частные коэффициенты последствий отказа γ_n учитывают значимость для конструкции последствий отказа, включая значимость типа отказа[1)]. Для незащищенного компонента (такого, как лопасть) требуется более высокий уровень защиты от последствий отказа, чем для защищенного компонента. Эти факторы должны быть учтены при испытаниях.

8.2.4 В ходе проектирования частные коэффициенты нагрузок γ_f учитывают неопределенности нагрузок. Испытуемая лопасть должна быть способна выдерживать расчетную нагрузку (которая включает в себя соответствующие частные коэффициенты).

8.3 Коэффициенты испытательной нагрузки

8.3.1 Если распределение вероятности отказов отсутствует для конкретной лопасти и конкретной технологии производства, то используют следующие коэффициенты испытательной нагрузки:

- для статических испытаний $\gamma_{su} = 1,1$;
- для испытаний на усталость $\gamma_{sf} = 1,1$.

Коэффициент статической нагрузки применяют как минимум для одного из двух статических испытаний (перед и после испытаний на усталость). Для другого статического испытания γ_{su} принимают равным 1,0.

8.3.2 При преобразовании расчетной нагрузки на усталость в испытательную нагрузку возникает погрешность из-за возможной накопленной усталости.

При ускоренном испытании на усталость уменьшают число циклов нагрузки, в связи с чем возрастает погрешность, связанная с преобразованием расчетного значения нагрузки на усталость в испытательную нагрузку. Это учитывают, применяя коэффициент испытательной нагрузки на усталость γ_{ef}.

В таблице 1 приведены рекомендованные значения коэффициента γ_{ef} для различных значений циклов нагрузки (см. приложение D).

Таблица 1

Число циклов нагрузки	γ_{ef}
$5 \cdot 10^5$	1,065
10^6	1,050
$2,5 \cdot 10^6$	1,035
$5 \cdot 10^6$	1,025
10^7	1,015

Примечание — Допускается применять число циклов, отличное от приведенных в таблице 1. В этом случае коэффициент γ_{ef} определяют методом интерполяции или экстраполяции.

8.3.3 В общем случае условия испытаний более благоприятные, чем реальные и расчетные условия работы. Это учитывают, применяя соответствующие коэффициенты, тем самым снижая влияние на результаты испытаний.

Если условия испытаний более мягкие, то необходимо увеличение испытательной нагрузки. Степень ее увеличения необходимо проверить оценкой распределения испытательной нагрузки (см. приложение E).

8.4 Применение коэффициентов нагрузки для получения целевой нагрузки

Для испытаний расчетную нагрузку пересчитывают в целевую нагрузку. Испытательная нагрузка должна быть равна целевой. Определение целевой нагрузки основано на прочности и/или накопленной усталости и упругих свойствах используемых материалов.

Целевую нагрузку $F_{target\text{-}u}$ для статического испытания вычисляют по формуле

---

1) В некоторых стандартах это учитывают применением различных частных коэффициентов нагрузок.

$$F_{target\text{-}u} = F_{du} \cdot \gamma_{nu} \cdot \gamma_{su} \cdot \gamma_{lu}, \quad (1)$$

где F_{du} — расчетная нагрузка (включая коэффициент нагрузки γ_f, см. 8.2.1);

γ_{nu} — частный коэффициент последствий отказа (см. 8.2.3);

γ_{su} — коэффициент испытательной нагрузки, учитывающий вариацию лопастей (см. 8.3.1);

γ_{lu} — коэффициент испытательной нагрузки, учитывающий влияние окружающей среды (см. 8.3.3).

Целевую нагрузку $F_{target\text{-}f}$ для испытания на усталость вычисляют по формуле

$$F_{target\text{-}f} = F_{df} \cdot \gamma_{nf} \cdot \gamma_{sf} \cdot \gamma_{ef} \cdot \gamma_{lf}, \quad (2)$$

где F_{df} — расчетная нагрузка, эквивалентная разрушающей (с учетом коэффициента нагрузки γ_f, см. 8.2.1);

γ_{nf} — частный коэффициент последствий отказа (см. 8.2.3);

γ_{sf} — коэффициент испытательной нагрузки, учитывающий фактическое отличие лопастей (см. 8.3.1);

γ_{ef} — коэффициент испытательной нагрузки, учитывающий погрешность определения накопленной усталости (см. 8.3.2);

γ_{lf} — коэффициент испытательной нагрузки, учитывающий влияние окружающей среды.

9 Определение испытательной нагрузки

9.1 Общие положения

Для каждого испытания нагрузка должна быть отражена в плане испытания. Должна быть обеспечена необходимая информация, позволяющая оценить испытательную нагрузку относительно целевой нагрузки. Должны быть заданы шесть компонентов нагрузки, включая фазу и частоту, для генерирования комбинированных условий нагрузки. Должна быть четко определена относительная система координат для компонентов нагрузки (см. раздел 4). Большой прогиб лопасти во время испытания, как правило, приводит к изменению направления и увеличению нагрузки (см. приложение А). Эффект изменений направления нагрузки должен быть корректно учтен при подготовке планов испытания, отчетов и определения погрешности по 10.1.3.

Необходимо определить значение испытательной нагрузки с учетом того, что при испытании должно быть подтверждено, что лопасть способна выдерживать целевую нагрузку. Необходимо проверить, на каких участках лопасти испытательная нагрузка равна или превышает целевую. Поскольку отличие целевой и испытательной нагрузок зависит от участка лопасти, то оценку следует выполнять на всех областях лопасти, подвергающихся испытанию (примеры см. в приложении С).

Нагрузки на критические механические и электрические подсистемы, такие как тормоза и компоненты защиты от возгорания, часто отличаются по характеристикам от общей нагрузки на лопасти, и могут потребоваться дополнительные уточнения и специальные испытания. Маловероятно, что для оценки целостности подсистемы достаточные условия нагрузки будут обеспечены стандартными испытаниями. Для моделирования специальных условий нагрузки могут потребоваться дополнительные испытания, включая кручение и радиальную нагрузку. Для систем, отказы которых могут привести к небезопасному функционированию установки, могут потребоваться дополнительные проверки соответствующего уровня целостности конструкции. Суммарное повреждение не должно приводить к функциональным отказам подсистем. Нагрузки для испытаний подсистем лопастей в настоящем стандарте не рассмотрены.

9.2 Влияние нагрузки

Если испытательная нагрузка сконцентрирована на ограниченном числе участков лопасти, эти участки могут быть перегружены или повреждены. По этой причине данные, полученные на этих участках лопасти, не включают в общий анализ или оценку результатов. Длина (в продольном направлении) поврежденных участков может быть оценена вычислениями или измерениями.

Допустимо предположение, что длина этих участков может достигать трех четвертей длины хорды по обеим сторонам лопасти. Поэтому при разработке суппорта необходимо учитывать участки, особо чувствительные к потере устойчивости (например, задняя кромка при сжатии).

Также вышеуказанные требования относятся к ситуации, когда для испытаний выполнены специальные модификации лопасти (см. раздел 6).

9.3 Нагрузка при статических испытаниях

При статических испытаниях испытуемая область должна быть нагружена по каждому из наиболее критических условий проектной нагрузки с учетом различия в серии изготовленных лопастей и отличия между лабораторными условиями и реальными условиями окружающей среды (см. 8.3.1 и 8.3.3).

При различных распределениях или направлениях нагрузки необходимо рассматривать разную предельную нагрузку в каждой испытуемой области. Распределения нагрузки см. в С.1 (приложение С).

Следует отметить, что лопасть может быть более чувствительна для определенных направлений приложения нагрузки. Максимальную нагрузку лопасть должна выдерживать во всех направлениях. Поскольку у многих материалов, используемых для изготовления лопасти, происходит снижение прочности с увеличением длительности нагрузки, продолжительность испытательной нагрузки должна быть как минимум в течение времени действия пиковой проектной нагрузки. Если есть достоверная информация о продолжительности расчетной пиковой нагрузки лопасти, то испытательные нагрузки и их продолжительность основывают на ней, если данных нет, то время воздействия нагрузки должно быть не менее 10 с.

Все участки считают выдержавшими испытание, если нагрузка в процессе статического испытания равна или превышает целевую нагрузку. Если при нагрузке, превышающей целевую, произошло повреждение, то допускается провести ремонт перед испытанием на усталость.

9.4 Нагрузка при испытании на усталость

В испытуемых областях нагрузка должна быть такой, чтобы создавать накопленное усталостное воздействие, равное накопленной усталости при целевых нагрузках. Испытательные нагрузки выбирают таким образом, чтобы сократить время испытания.

Уменьшая число циклов в процессе испытания, увеличивают нагрузку, создавая условия испытаний возможно более близкими к реальным условиям эксплуатации.

Увеличение числа циклов теоретически должно привести к эквивалентному суммарному усталостному воздействию, с учетом следующего:

- максимальные значения усилия или напряжения могут превзойти статическую прочность материала и, следовательно, привести к статическому повреждению;
- усилие или напряжение может быть столь высоким, что предположение о линейности между нагрузкой и напряжением становится неприменимым, как в случае с продольным изгибом;
- внутренний нагрев сильнонапряженных участков.

В случае приложения нагрузки с переменной амплитудой эти состояния могут быть достигнуты при относительно низком коэффициенте увеличения нагрузки. В этом случае допускается далее увеличивать только частоту нагрузки, а амплитуда должна оставаться постоянной.

Средняя нагрузка при испытании на усталость должна быть максимально приближенной к средней нагрузке в условиях эксплуатации.

Участки лопасти считают выдержавшими испытание, если теоретическое воздействие (например, суммирование Майнера) во время испытания на усталость равно или превышает теоретическое воздействие, основанное на целевой нагрузке.

Теоретическое испытательное воздействие допускается определять суммированием воздействия всех испытаний.

Когда некоторые участки лопасти разрушаются после воздействия на них теоретической испытательной нагрузки, которая превышает или равна разрушающей, эти участки считают выдержавшими испытание. Испытание лопасти допускается продолжать до достижения разрушения на других участках.

В случае разрушений, вызванных нагрузкой, превышающей целевую, допускается ремонт. Последствия любого ремонта должны быть оценены.

10 Испытания

10.1 Общие положения

10.1.1 Все действия во время испытания, в том числе результаты испытаний, заносят в протокол.

10.1.2 Все испытательное оборудование должно быть аттестовано. Если применяют датчики, которые невозможно самостоятельно откалибровать, то на них должно быть свидетельство о калибровке. Процедура контроля, калибровки, обслуживания, контрольных измерений испытательного оборудования должна быть разработана и применена в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17025. По мере возможности следует проводить полную калибровку системы, проверяя характеристики всех системных компонентов. Во время процедуры адресно допускается проводить повторную калибровку датчиков, которые могут быть повреждены в результате аварийного повреждения лопасти или оборудования при испытании[1)].

10.1.3 Все погрешности испытательного оборудования должны быть отражены в протоколе.

Дополнительно необходимо определить и записать в протокол следующие погрешности:

- погрешность масштабирования, определения направления и точки приложения любой прилагаемой нагрузки;
- погрешность масштабирования, определения направления и перемещения;
- погрешность масштабирования, определения направления и локализации измеряемого напряжения[2)].

10.1.4 Если планируют испытания в области комеля лопасти, то необходимо оценить отклонения между положением испытательного стенда и лопастью.

Измеренная величина прогиба лопасти должна быть скорректирована при деформации оснастки комеля лопасти и испытательного стенда. Влияние испытательного стенда должно быть учтено при измерении собственной частоты, затухания и формы образца. Для относительно жестких испытательных стендов (влияние на прогиб менее 1 %) их влиянием допускается пренебречь.

10.1.5 Записи условий окружающей среды могут потребоваться для количественной оценки влияния на результаты испытаний таких факторов, как изменение жесткости лопасти и изменение показаний датчиков напряжения или других датчиков.

Как минимум необходимо фиксировать температуру снаружи, внутри и на поверхности лопасти, чтобы определить разность между температурой окружающей среды и температурой лопасти. Эти записи фиксируют с интервалом, достаточным для отслеживания отклонений во время всех испытаний.

Для материалов, подверженных воздействию влаги, фиксируют значение влажности окружающей среды с интервалом, достаточным для отслеживания отклонений во время испытания.

10.1.6 Коррекции

10.1.6.1 На результаты испытаний может оказывать влияние дополнительная (гравитационная) нагрузка, не являющаяся частью испытательной нагрузки и которая не фиксируется испытательным оборудованием. Эти нагрузки должны быть учтены во время испытания и при обработке результатов.

На нагрузки могут влиять массы:

- самой лопасти;
- оснастки (привод, аппаратура распределения нагрузки, зажимы и т. п.);
- кабелей, строп и датчиков.

Дополнительная нагрузка и ее расположение относительно системы координат лопасти должны быть задокументированы.

10.1.6.2 По мере изгиба лопасти направление нагрузки относительно ориентации лопасти может меняться (см. приложение F).

[1)] Повреждение лопасти или оборудования может вызвать перегрузку датчиков. Из-за возможных сильных динамических эффектов эта перегрузка может возникнуть на короткие промежутки времени и не быть обнаруженной (полностью) измерительной системой.

[2)] Погрешность датчиков деформации, как правило, не превышает 1 %. Датчики обычно изготавливают из более прочного материала, чем покрытие лопастей. Поэтому конструкция датчиков может влиять на результат измерения в месте их расположения на поверхности с утолщенным покрытием. Результат измерения на поверхностях с утолщенным покрытием может не соответствовать реальному напряжению в материале. Применение нескольких датчиков деформации или удаление покрытия шлифованием позволит снизить разность значений между измеренным и фактическим напряжением.

10.1.6.3 Нагрузка, не действующая через ось упругости из-за прогиба, скручивания или настроек испытательного оборудования, будет создавать в лопасти крутящие моменты. Эти моменты могут быть значительными и должны быть учтены при определении испытательной нагрузки. Применяемые нагрузки могут быть целенаправленно компенсированы созданием рассчитанного крутящего момента по оси упругости.

10.2 Статические испытания

10.2.1 Испытание с применением статических нагрузок используют для получения двух типов данных. Первый набор данных характеризует способность лопасти сопротивляться нагрузке, на которую она была рассчитана. Второй набор данных характеризует напряжение и изгиб лопасти, вызванные приложенными нагрузками. Для удобства все данные получают во время одного и того же статического испытания, что не является обязательным требованием.

10.2.2 Во время испытания статической нагрузкой измеряют и документируют следующее:

- величину и направление приложенной(ых) нагрузки(ок) при пяти значениях диапазона испытательной нагрузки (см. 10.2.3);
- время для обеспечения минимального времени воздействия нагрузки (см. 9.3).

10.2.3 Напряжение на комеле лопасти измеряют предпочтительно датчиками в заданных областях напряжения в одном или более направлениях. Как минимум испытанию подвергают:

- основные конструктивные элементы, испытывающие несущую нагрузку (полки лонжерона, несущие балки), в верхней и нижней плоскостях корпуса лопасти в четырех поперечных сечениях. Напряжение измеряют вдоль продольной оси лопасти;
- заднюю и переднюю кромки в положении максимальной длины хорды и в половине длины. Напряжение обычно измеряют в направлении, параллельном кромкам лопасти;
- узлы в районе комеля лопасти и узлы с вычисленным высоким напряжением. Для измерения напряжения сдвига обычно применяют тензодатчики;
- два наиболее нагруженных соединяющих болта, если болты включены в интегрированную область испытания. Испытания проводят на растяжение и сдвиг.

Другими важными областями измерения напряжения на лопасти являются области, в которых присутствуют геометрические стыки и критические элементы или области с ожидаемым высоким напряжением.

Расположение и ориентацию каждого измерения напряжения документируют. Измерение напряжения выполняют минимум при пяти значениях диапазона испытательной нагрузки.

10.2.4 Прогиб измеряют в нескольких точках, соответствующих напряженному состоянию лопасти, но не менее чем в трех областях. Прогиб от крыла измеряют на достаточном числе участков и с достаточно высокой нагрузкой для подтверждения проектного расчетного прогиба лопасти.

10.3 Испытание на усталость

При испытании на усталость измеряют и документируют:

- число циклов;
- значения параметров испытания лопасти (например, нагрузка, прогиб, ускорение, напряжение).

При испытании проверяют работоспособность датчиков. Если при испытании датчик или оборудование выходят из строя, то оценивают критичность этого события для результата испытания; все, что критично, исправляют или заменяют. Для подтверждения достоверности оценки испытания на усталость жесткость лопасти в ходе испытания должна быть проверена несколько раз (например, пять раз) и задокументирована.

10.4 Испытания других параметров и характеристик лопасти

10.4.1 Определяют массу лопасти и расположение центра тяжести по размаху с учетом элементов лопасти (например, болты комеля).

10.4.2 Как минимум измеряют первую и вторую собственные частоты плоскости и первую частоту кромки. Масса испытательного оборудования может влиять на результат измерения собственной частоты лопасти.

10.4.3 Может возникнуть необходимость в проведении испытаний других характеристик лопасти. Эти испытания могут включать в себя следующее (но они не ограничиваются этим перечнем):

- демпфирование;

- изменение формы;
- ползучесть;
- распределение массы;
- распределение твердости.

11 Оценка результатов

11.1 Общие положения

До начала испытания, после каждого испытания и периодически в ходе испытания на усталость лопасть необходимо визуально проверять как снаружи, так и внутри.

Дополнительно к визуальному осмотру проводят инфракрасное или ультразвуковое обследование и акустическую эмиссию.

Результаты обследования заносят в протокол. Обследование должно сопровождаться соответствующей документацией.

Важные установленные или внедренные электронные системы, такие как регулятор затухания или датчики управления, проверяют на правильное функционирование.

Необратимые изменения свойств лопасти считают повреждением. К повреждениям относят:

- аварийную поломку испытуемой лопасти;
- остаточную деформацию, потерю жесткости или изменение других свойств;
- поверхностное повреждение.

Выявленное повреждение должно быть осмотрено проектировщиком для его оценки (см. 11.5).

Для детального изучения повреждения после испытания лопасть может быть разделена на секции.

11.2 Аварийная поломка

Аварийная поломка — это разрушение компонентов или всей испытуемой лопасти.

В результате аварии нарушаются функционирование лопасти и требования безопасности. Аварийными поломками считают:

- поломку или разрушение конструкции лопасти;
- полное разрушение структурных элементов, таких как внутренние или внешние соединяющие направляющие, покрытия, поперечный каркас, крепеж комеля и т. д.;
- отделение важных частей от основной конструкции.

В процессе испытаний аварийные поломки, как правило, хорошо видны.

Осмотр должен быть задокументирован, в том числе с применением фото- или видеоматериалов.

11.3 Остаточная деформация, потеря жесткости или изменение других свойств лопасти

Массу, центр тяжести и собственную частоту колебаний измеряют/определяют до статического испытания (см. 7.2, 10.4.1 и 10.4.2) и оценивают в сравнении с проектными значениями. Другие свойства лопасти по 10.2.3 и 10.2.4 (распределение напряжения и изгиб) определяют как после статического испытания, так и после испытания на усталость.

По результатам измерений по 10.2.2—10.2.4 и 10.4.2 оценивают потерю жесткости и/или остаточную деформацию лопасти.

11.4 Поверхностное повреждение

Время и степень повреждения поверхности лопасти должны быть указаны в протоколе испытаний.

К поверхностным повреждениям относят следующее:

- небольшие трещины на покрытии или на линиях стыков;
- разрушение покрытия;
- отслаивание краски;
- поверхностные пузырьки;
- незначительный поверхностный изгиб без остаточной деформации или повреждений;
- небольшое расслоение.

Если устранение каких-либо поверхностных повреждений предусмотрено руководством по эксплуатации данного типа лопасти, то такие повреждения допускается устранять в процессе проведения испытаний. Проведение всех ремонтных работ документируют в соответствии с разделом 6.

11.5 Оценка повреждений

Повреждение в виде остаточной деформации или жесткости может быть критическим или привести к потере функциональных характеристик лопасти.

В условиях эксплуатации лопасти поверхностное повреждение может со временем развиться в функциональное или критическое.

Необходимо оценить повреждения, выявленные при начальных статических испытаниях и испытаниях на усталость, и их влияние на безопасность с учетом возможности их развития. Принципы этой оценки не рассмотрены в настоящем стандарте.

12 Требования к протоколам

12.1 По результатам испытаний должны быть оформлены протоколы, содержащие достаточную информацию, чтобы испытания и их результаты были сопоставимыми.

12.2 Протокол(ы) должен (должны), в зависимости от вида испытания, содержать в себе следующее:

- содержание;
- ответственный исполнитель;
- дата и место проведения;
- данные об идентификации лопасти;
- описание лопасти;
- настройка испытательного оборудования;
- описание испытательной нагрузки;
- использованное испытательное оборудование (включая изготовителя, модель, серийные номера и т. п.);
- сведения о калибровке;
- расположение датчиков и точек измерения;
- особенности тарировки (дополнительная нагрузка, напряжение и т. п.);
- оценка погрешностей;
- описание проверок, ремонта и осмотров;
- краткое описание метода испытания и результатов;
- отклонения от программы испытаний, лабораторных процедур;
- справочная информация (программа испытаний, лабораторные процедуры).

12.3 Оценка результатов испытаний по отношению к проектным требованиям должна включать в себя следующее:

- оценку испытательной нагрузки, включая ее распределение;
- оценку результатов испытаний в сравнении с расчетными данными;
- оценку жесткости лопасти.

Приложение А
(справочное)

Руководящие принципы необходимости повторения статического испытания и испытания на усталость

Отладка производства, совершенствование проектирования и общая оптимизация технологии изготовления влияет на параметры и характеристики лопастей, поэтому лопасть, которую полномасштабно испытывали, часто отличается от серийной продукции. Поскольку проведение испытания после каждого изменения или улучшения непрактично, то необходимо различать изменения, при которых следует или не следует повторять полномасштабное испытание.

Конкретное изменение конструкции лопасти может привести к необходимости проведения ограниченного набора испытаний, например только статические испытания, только испытание на усталость, испытание только в одном направлении и т. д.

В целом изменения, улучшающие лопасть, как правило, не вызывают необходимость проведения повторного полномасштабного испытания. Однако изменения, влияющие на нагрузку установки, значительно влияют на проектные параметры лопасти. Некоторые примеры изменений и улучшений в производстве и разработке лопастей, приводящие или не приводящие к обновленному полномасштабному испытанию, приведены в таблице А.1.

Таблица А.1

Изменение и улучшение, приводящие к обновленному полномасштабному испытанию	Изменение и улучшение, не приводящие к обновленному полномасштабному испытанию
Модификация формы профиля вокруг значимых испытуемых областей (например, самая большая хорда)	Модификация формы наконечника лопасти
Укорачивание некоторых слоев волокон	Удлинение некоторых слоев волокон
Переход на новый тип полимера или новый тип волокна (например, переход с полиэстерного на эпоксидное связующее, со стекловолокна на углеродное волокно)	Небольшие изменения материалов, как часть постоянных изменений у поставщика материалов или переход на другого поставщика аналогичных материалов. В последнем случае потребуется испытание на уровне образцов
Переход на новый тип основного материала с иным модулем Юнга или модулем сдвига в многослойных конструкциях (часто комбинируют с изменением толщины основного материала)	Изменения некоторых внутренних материалов в многослойных конструкциях
Большие изменения в последовательности слоев многослойных конструкций	Небольшие изменения в последовательности слоев ламината
Переход на новый метод производства (например, ручное впрыскивание)	Небольшие изменения в производственном процессе (например, изменение в цикле вулканизации)

Кроме того, изменения или улучшения конструкции лопасти могут стать причиной изменения проектной нагрузки на лопасть. В этом случае обновленное полномасштабное испытание будет необходимо только для определения увеличенной расчетной нагрузки. Когда расчетная нагрузка изменена, необходимо выполнить оценку испытательной нагрузки относительно расчетной.

Приложение В
(справочное)

Области испытаний

Для испытаний определяют потенциально критичные области:

- внутренняя часть лопасти от пролета в сторону секции, где свойства изменяются ступенчато;
- части лопасти, в отношении которых расчет показывает минимальный коэффициент запаса по прогибу, прочности, продолжительности накопленной усталости;
- если использовано аэродинамическое устройство торможения (или другое устройство), часть лопасти, взаимодействующая с этим устройством, особенно в месте, где устройство влияет на прочность.

Независимо от используемого метода испытаний, достичь правильного распределения нагрузки на наиболее удаленном участке лопасти достаточно сложно. В большинстве случаев это не является основной проблемой, поскольку запас безопасности у лопасти обычно растет при приближении к границе лопасти.

Учитывая, что результаты испытания наиболее удаленных участков лопасти могут быть менее значимы из-за большого запаса безопасности, проблема правильного распределения нагрузки может быть решена отрезанием кончика лопасти перед испытанием.

Как правило, при отрезании кончика должна остаться достаточно большая часть лопасти для возможности испытания секций с меньшим запасом безопасности. Допускается также увеличить испытательную нагрузку в другой части лопасти, принципиально схожей с участком с минимальным запасом безопасности, в соответствии со следующим расчетом.

Испытательные нагрузки увеличивают на коэффициент увеличения нагрузки f, вычисляемый по формуле

$$f = \frac{S_{ref}}{S_{\min}}, \tag{B.1}$$

где S_{ref} — запас безопасности в секции, выбранной для проверки прочности, с самым низким коэффициентом безопасности;

$S_{\min}$ — запас безопасности в секции с самым низким запасом безопасности.

Формулу (В.1) используют для каждого типа повреждения, а максимальное значение f применяют при определении испытательных нагрузок.

Приложение С
(справочное)

Определение испытательной нагрузки

С.1 Статическая целевая нагрузка

Диапазон нагрузок выбирают исходя из развития событий по наихудшему варианту. Направление и величину расчетных нагрузок необходимо выбирать таким образом, чтобы они перекрывали этот диапазон. Затем расчетные нагрузки необходимо уточнить с учетом погрешностей, связанных с приложением испытательной нагрузки, влиянием окружающей среды и отличием лопастей друг от друга.

В следующем примере нагрузка ограничена только нагрузками вдоль размаха лопасти и в направлении, перпендикулярном к оси несущей поверхности. Для проверки сопротивления лопасти этой нагрузке в любом запланированном состоянии необходимо вычислить результирующий вектор нагрузки. В примере на рисунке С.1 приведена диаграмма крутящего момента для типовой лопасти. Диаграмма выполнена по данным нагрузки при 10 различных условиях. Линии показывают нагрузку вдоль размаха лопасти. Результирующий вектор нагрузки определен вокруг оси лопасти с шагом 15°. Он показывает, что при испытании только по направлению вдоль размаха лопасти и в направлении, перпендикулярном к оси несущей поверхности, расчетная нагрузка не перекрывается.

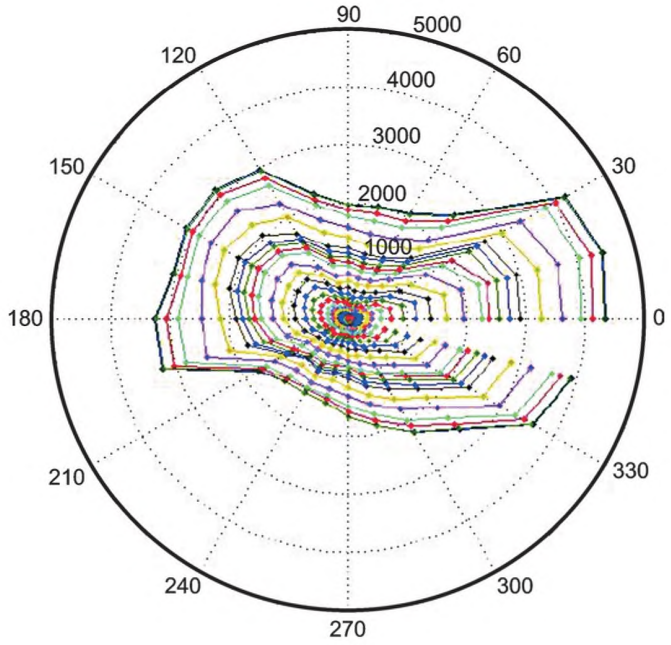


Рисунок С.1 — Полярная диаграмма диапазона нагрузок типовой лопасти

С.2 Нагрузка при испытании на усталость

Для каждой испытуемой части лопасти должно быть показано, что повреждение в результате испытательной нагрузки более или равно повреждению от целевой нагрузки.

Для определения влияния системы нагрузки, она должна быть преобразована в напряжение или усилие.

Для того чтобы избежать накопления погрешностей, повреждения от испытательной и целевой нагрузок определяют идентичными методами.

На практике все части лопасти не могут быть тщательно испытаны. Критерием необходимости испытания определенных участков лопасти может быть запас прочности на данных участках.

Запас прочности выражают в виде коэффициента усталостного напряжения *FSF*. Это коэффициент, на который необходимо умножить нагрузку, для получения повреждения, эквивалентного единичному. Поскольку определение повреждения является нелинейным процессом, то *FSF* определяют итерациями. В областях с высоким коэффициентом присутствует большой запас от усталостного разрушения, поэтому необходимость испытания этих участков менее важна. Если коэффициент близок к единице, то область критична из-за усталости и требуется проведение испытания.

Для правильного испытания заданной области испытательная нагрузка должна быть не менее целевой нагрузки. Это означает, что *FSF* для испытания на усталостную нагрузку должен быть менее *FSF* для целевой усталостной нагрузки.

Соотношение между *FSF* целевой нагрузки и *FSF* испытательной нагрузки допускается определять как функцию *FSF(rFSF)*. Коэффициент относительного усталостного напряжения *rFSF* вычисляют по формуле

$$rFSF = \frac{FSF_{target}}{FSF_{test}}, \quad (C.1)$$

где FSF_{target} — коэффициент усталостного напряжения целевой нагрузки;

FSF_{test} — коэффициент усталостного напряжения испытательной нагрузки.

Во всех областях, где *FSF* более единицы, лопасть должна быть испытана.

В качестве примера проводят оценку испытательной нагрузки для типовой лопасти длиной 62,5 м. Приведенный пример относят только к нагрузке лопасти в продольном направлении. Оценку испытательной нагрузки проводят для последовательного одноосевого нагружения, при котором лопасть нагружают только в плоскостном направлении и в направлении смещения. Для лопасти длиной 62,5 м напряжение вычисляют через каждые 2 м в 26 областях, распределенных по окружности хорды вдоль размаха лопасти. По результатам испытаний определяют коэффициенты *FSF*.

Определяют износ лопасти после 20 лет службы. *FSF* представлены на контурной диаграмме на рисунке С.2. В данном примере области со значением *FSF* менее 1,4 признают критическими.

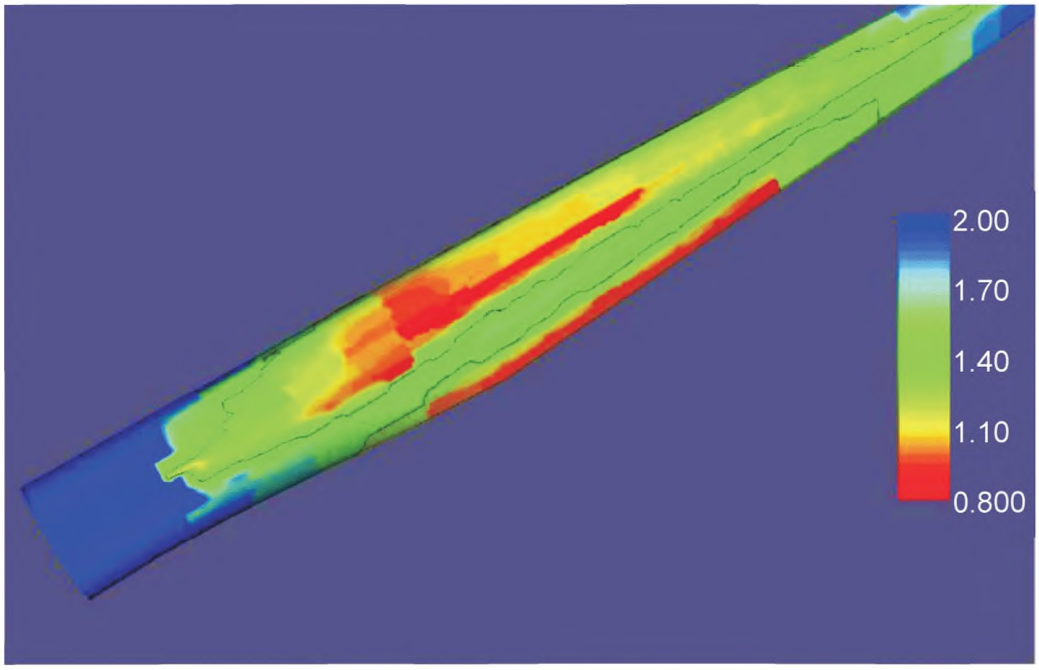


Рисунок С.2 — Расчетный *FSF*

Черная линия на рисунке С.2 соединяет точки, в которых *FSF* равен 1,4. Области лопасти, в которых *FSF* менее 1,4, должны быть испытаны. Для наглядности эти области выделены красным цветом на рисунке С.3.

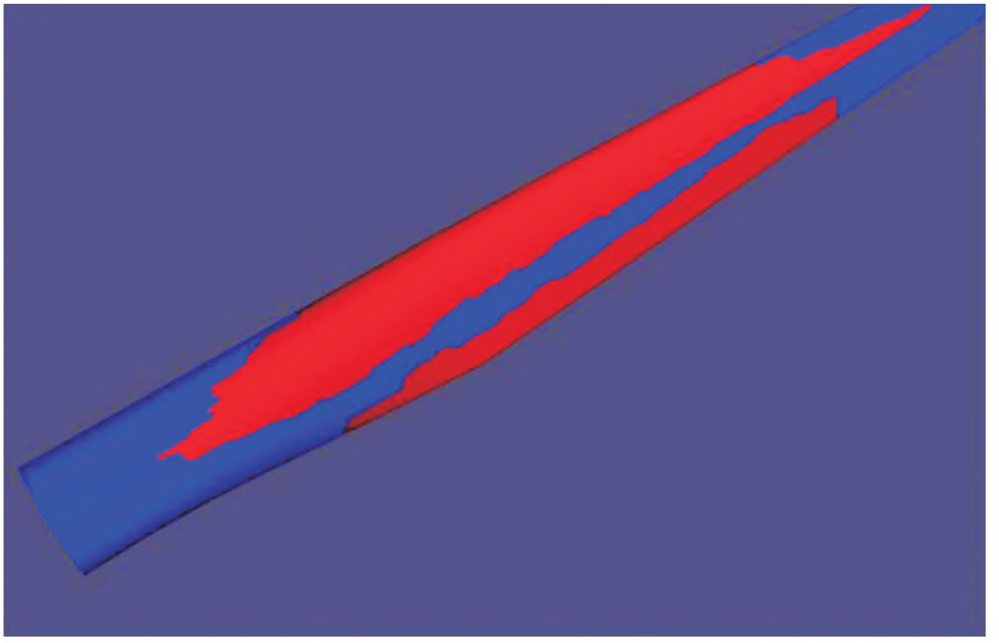


Рисунок С.3 — Области с расчетным *FSF* менее 1,4 (критические области)

Также должны быть рассмотрены области, в которых может возникнуть напряжение, например области с высокой концентрацией напряжения в болтовом соединении комеля лопасти и области между комелем лопасти и максимальной хордой.

С.3 Последовательное одноосевое нагружение

На одном участке прикладывают две отдельные циклические нагрузки. Нагрузку прикладывают на участке с радиусом, равным 40,0 м. Погрешностью, связанной с ускорением лопасти, пренебрегают. Цикличность для каждой испытательной нагрузки составляет 1 млн циклов. На рисунке С.4 приведено отношение полученного в результате испытаний и расчетного *FSF*. На диаграмме рисунка С.1 критические области, приведенные на рисунке С.3, выделены также черной линией. На рисунке С.4 также видны испытанные критические области, которые перегружены более чем на 30 %. Этот пример относится только к точке с одной приложенной нагрузкой без учета инерционного эффекта.

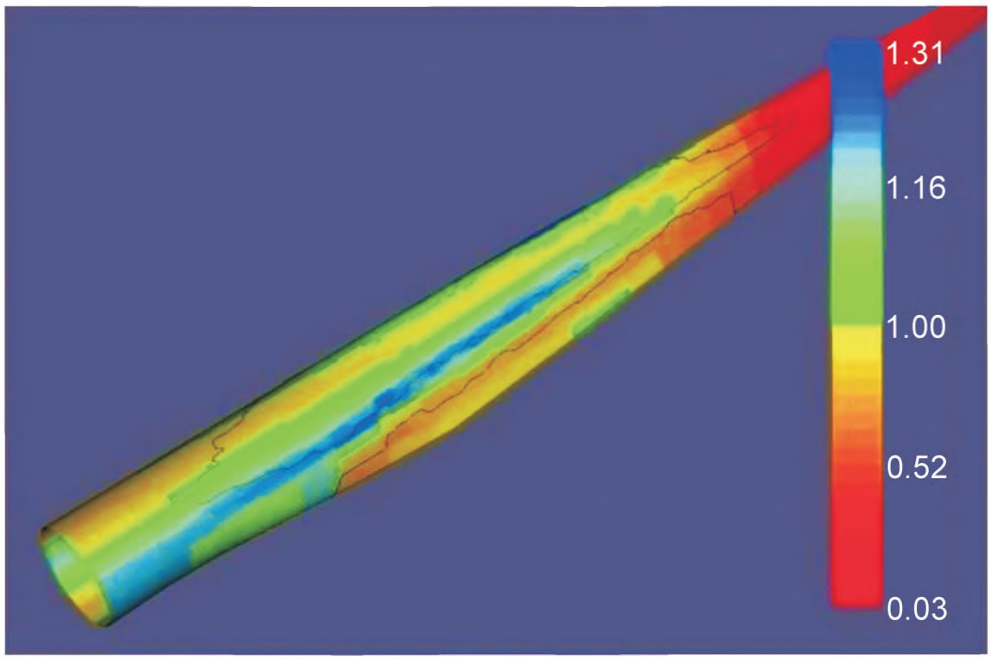


Рисунок С.4 — *rFSF* и критические области, последовательное одноосевое нагружение

С.4 Двухосевое нагружение

Второй пример представляет двухосевое нагружение, при котором приложена плоскостная нагрузка и нагрузка в направлении, перпендикулярном к оси несущей поверхности, со смещением фазы на 90° таким образом, что точка приложения нагрузки описывает в пространстве эллипсоидную траекторию. Контур *rFSF* показан вместе с критической областью, приведенной на рисунке С.5.

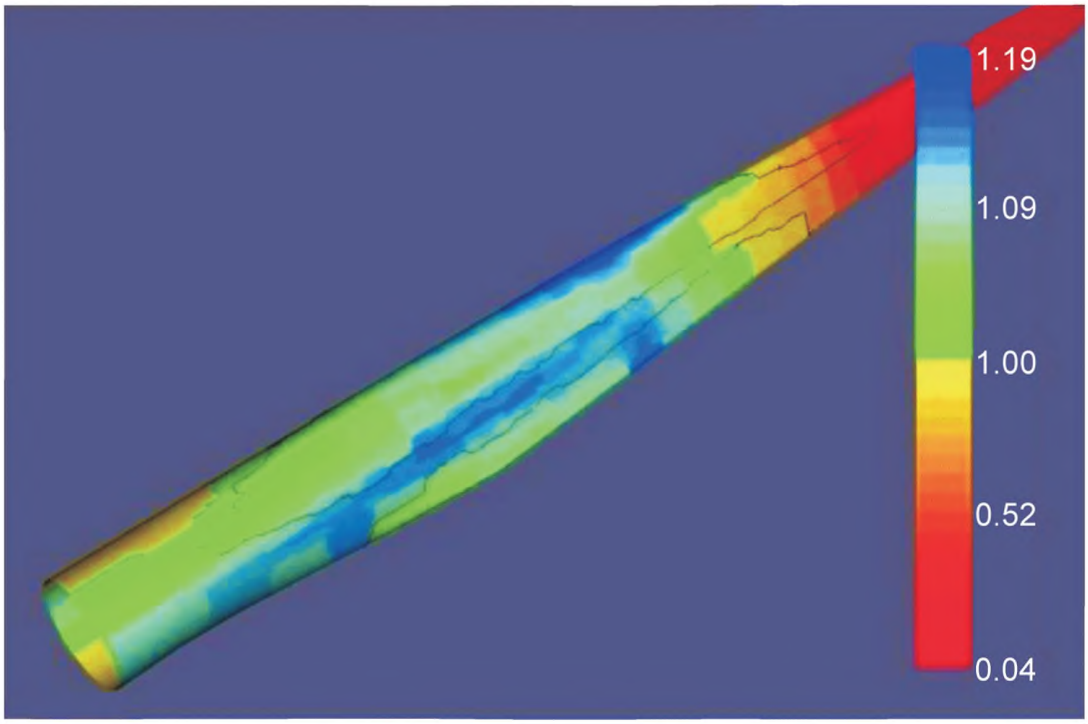


Рисунок С.5 — *rFSF* и критическая область, двухосевое нагружение

Следует отметить, что при этом нагружении испытывают значительно большую часть критической области, в то время как перегрузка в этой области ограничена 19 %. В этом примере для определения критической области выбирают значение *FSF* 1,4. Возможно допущение, что для обоих типов испытаний часть критической области проверена недостаточно. С учетом результатов статического испытания, можно убедиться в том, что результаты комбинированного нагружения (двухосевое) свидетельствуют, что значительная часть лопасти требует более тщательного исследования.

Приложение D
(справочное)

Определение числа циклов нагрузки при испытании на усталость

D.1 Общие положения

В настоящем приложении определяют рекомендованное число циклов нагрузки, применяемых при полномасштабном испытании лопастей на усталость.

Предполагают, что коэффициент испытательной нагрузки γ_{ef} = 1,05 является достаточным для испытания на усталость при 1 млн циклов нагрузки.

Установлено, что для полномасштабного испытания нагрузкой на усталость следует применять коэффициент γ_{ef} = 1,035 при примерно 2,5 млн циклов нагрузки.

Рекомендованные значения γ_{ef} для различного числа циклов нагрузки приведены в таблице 1.

D.2 Число циклов

Число циклов нагрузки, прикладываемых к лопасти во время полномасштабного испытания на усталость, является решающим фактором продолжительности испытания на усталость. Поэтому стремление уменьшать число циклов нагрузки в целях снижения затрат на проведение полномасштабных испытаний может повлиять на достоверность результатов испытаний.

На основе коэффициентов, используемых для вычисления коэффициента испытательной нагрузки, подсчет выполняют для определения влияния числа циклов нагрузки при полномасштабном испытании на усталость на коэффициент нагрузки.

D.3 Применяемый подход

В первую очередь рассматривают диаграмму Гудмана, приведенную на рисунке D.1, упрощенную до односторонней диаграммы.

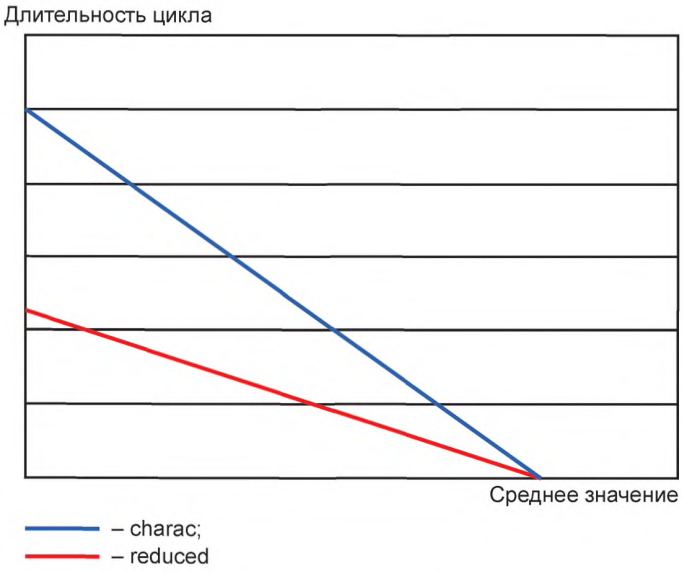


Рисунок D.1 — Упрощенная диаграмма Гудмана

Линия, обозначенная «Charac», пересекает горизонтальную ось в точке, представляющей статическую прочность конструкции *S*, и вертикальную ось в точке динамической устойчивости для одного цикла нагрузки *D*.

Линия «Reduced» действительна для некоторого числа циклов *n*. Эта линия также пересекает горизонтальную ось в точке *S*, но вертикальную ось пересекает в точке пониженного динамического напряжения для одного цикла нагрузки D_r вычисляют по формуле

$$D_r = \frac{D}{n^{(1/m)}}, \tag{D.1}$$

где D — динамическое напряжение для одного цикла нагрузки;

n — реальное число циклов нагрузки;

m — экспонента усталостного повреждения материала.

Повреждение, вызванное нагрузкой длительностью W и средним значением M, определяют фактическим числом циклов нагрузки n, деленным на допустимое число циклов нагрузки N, по формуле

$$\text{Повреждение} = \frac{n}{N} = \left[\frac{W}{-\frac{D_r}{S}\cdot M + D_r}\right]^m, \tag{D.2}$$

где N — допустимое число циклов нагрузки;

W — длительность нагрузки;

S — статическая прочность конструкции;

M — среднее значение нагрузки.

После подстановки формулы (D.1) в формулу (D.2) и преобразования, получают формулу (D.3).

$$\text{Повреждение} = \left[\frac{W\cdot S\cdot n^{(1/m)}}{D\cdot(S-M)}\right]^m. \tag{D.3}$$

Испытание на усталость продолжают до тех пор, пока испытательное повреждение, заданное формулой (D.4), не станет равным целевому повреждению, заданному формулой (D.5), где индекс «t» относится к испытательной нагрузке, а индекс «0» — к расчетной нагрузке, а значит, к целевому повреждению.

$$\text{Испытательное повреждение} = \left[\frac{W_t\cdot S\cdot n_t^{(1/m)}}{D\cdot(S-M_t)}\right]^m, \tag{D.4}$$

$$\text{Целевое повреждение} = \gamma_{test}\left[\frac{W_0\cdot S\cdot n_0^{(1/m)}}{D\cdot(S-M_0)}\right]^m, \tag{D.5}$$

где γ_{test} — коэффициент испытательной нагрузки.

Установив испытательное повреждение равным целевому, после некоторых преобразований получаем формулу (D.6).

$$W_t = \gamma_{test}\cdot W_0\cdot\frac{(S-M_t)}{(S-M_0)}\cdot\left(\frac{n_0}{n_t}\right)^{(1/m)}. \tag{D.6}$$

Для исследования чувствительности W_t к экспоненте усталостного повреждения m, по формуле (D.7) вычисляют производную W_t по m.

$$\frac{\partial W_t}{\partial m} = -\gamma_{test}\cdot W_0\cdot\frac{(S-M_t)}{(S-M_0)}\cdot\frac{\left(\frac{n_0}{n_t}\right)^{(1/m)}}{m^2}\cdot\ln\left(\frac{n_0}{n_t}\right). \tag{D.7}$$

Относительное влияние R изменения циклов нагрузки (n_{t1}) на (n_{t2}) вычисляют по формуле

$$R = \frac{\frac{\partial W_t}{\partial m}(n_t = n_{t1})}{\frac{\partial W_t}{\partial m}(n_t = n_{t2})} = \frac{\left(\frac{n_0}{n_{t1}}\right)^{(1/m)}\cdot\ln\left(\frac{n_0}{n_{t1}}\right)}{\left(\frac{n_0}{n_{t2}}\right)^{(1/m)}\cdot\ln\left(\frac{n_0}{n_{t2}}\right)} = \left(\frac{n_{t2}}{n_{t1}}\right)^{(1/m)}\cdot\frac{\ln\left(\frac{n_0}{n_{t1}}\right)}{\ln\left(\frac{n_0}{n_{t2}}\right)}, \tag{D.8}$$

где n_{t1} — первое (первоначальное) число циклов нагрузки;

n_{t2} — второе (итоговое) число циклов нагрузки.

Предполагаемое общее число циклов нагрузки в матрице Маркова $n_0 = 50 \cdot 10^6$, а экспонента усталостного повреждения $m = 9$. Если $n_{t1} = 2{,}5 \cdot 10^6$, а $n_{t2} = 10^6$, то по формуле (D.7) получаем $R = 0{,}7$. Следует отметить, что чувствительность R к изменениям n_0 и m минимальна.

Если значение γ_{ef}, равное 1,05, подходит для испытаний с 10^6 циклов, то это 5 %-ное увеличение нагрузки должно быть уменьшено до 3,5 % при испытании продолжительностью $2{,}5 \cdot 10^6$ циклов, т. к. $0{,}05 \cdot 0{,}7 = 0{,}035$. Результаты для различных значений числа циклов нагрузки при усталостном испытании приведены в таблице D.1.

Таблица D.1 — Рекомендованные значения для γ_{ef} для различного числа циклов нагрузки

n_{t1}	R	γ_{ef}
$5 \cdot 10^5$	1,3	1,064
10^6	1,0	1,050
$2{,}5 \cdot 10^6$	0,7	1,035
$5 \cdot 10^6$	0,5	1,025
10^7	0,32	1,016
Примечание — Значения вычислены по формуле (D.8) при $n_0 = 50 \cdot 10^6$, $n_{t2} = 10^6$ и $m = 9$.		

Результаты, приведенные в таблице D.1, представлены в виде графика на рисунке D.2.

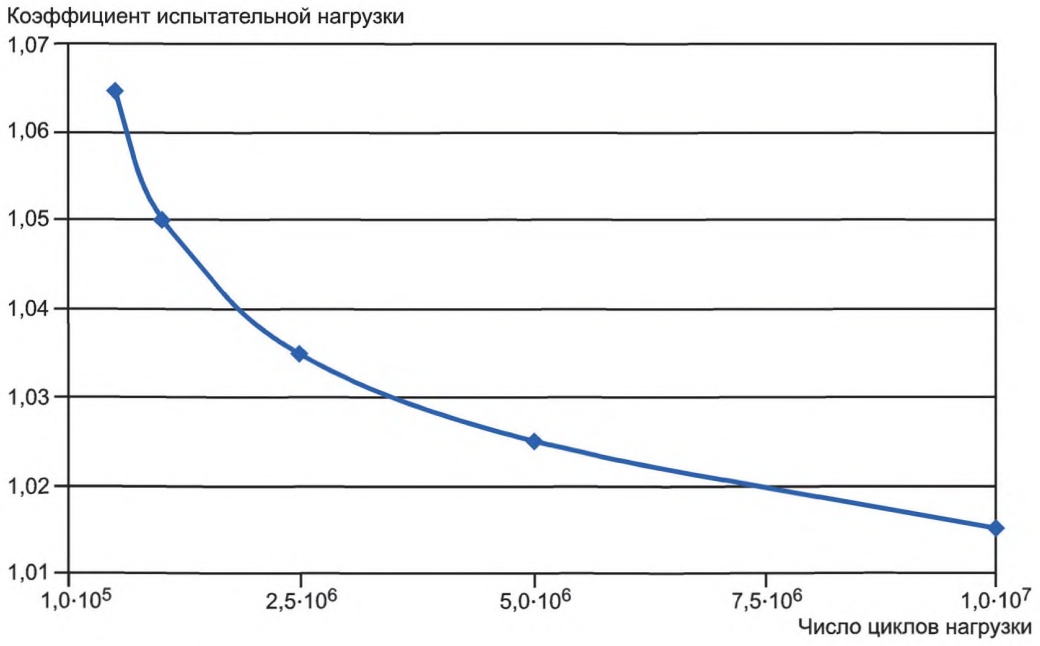


Рисунок D.2 — Коэффициент испытательной нагрузки γ_{ef} для различного числа циклов нагрузки

Приложение Е
(справочное)

Различие между расчетной и испытательной нагрузками

Е.1 Общие положения

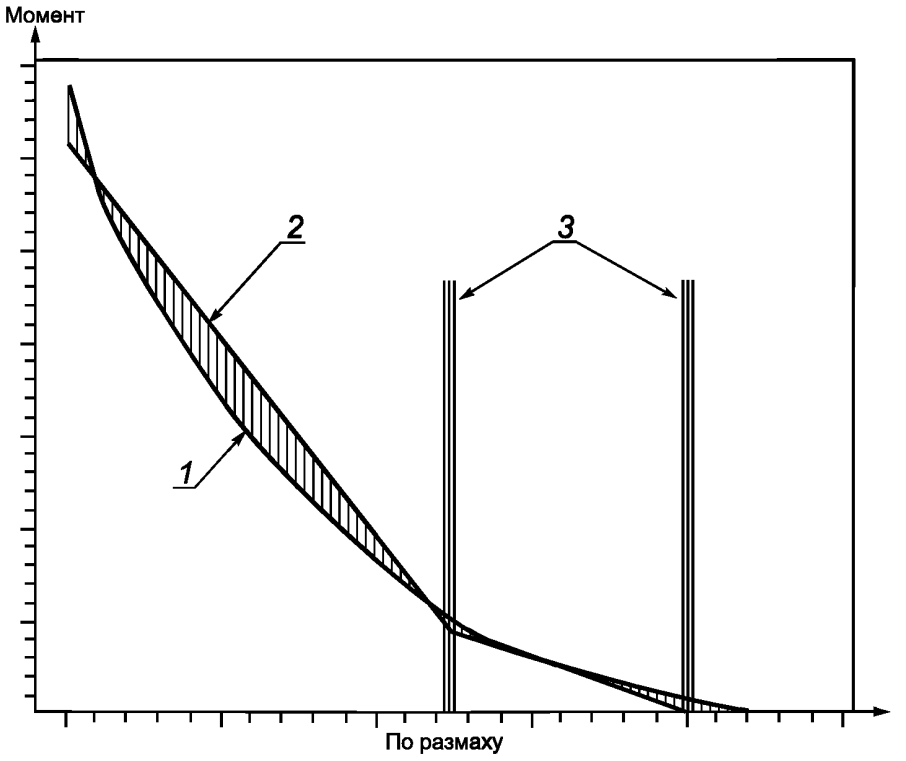
Испытание лопасти следует проводить в расчетных для лопасти условиях. Однако на практике существует множество ограничений возможности выполнения таких испытаний. В результате этих ограничений необходимы некоторые изменения и допущения в проведении статических и усталостных испытаний лопасти.

Е.2 Приложение нагрузки

Во время испытаний приложенная нагрузка, как правило, концентрируется в секциях вдоль размаха лопасти. Из-за концентрации нагрузки и возможности упрочнения поперечного сечения, можно предотвратить ожидаемую деформацию поперечного сечения, что изменит напряжение лопасти и/или локальное усилие. Поэтому эти точки приложения нагрузки должны находиться в стороне от испытуемых областей (см. 9.2 и приложение В).

Е.3 Крутящие моменты и сдвиг

При статическом испытании лопасти обычно нагружают в ограниченном числе секций — в местах, где распределена идеальная испытательная нагрузка. Это отражается на распределении моментов в секциях вдоль размаха лопасти (см. рисунок Е.1) и сил сдвига. Распределения моментов можно улучшить увеличением числа мест приложения нагрузки, но это приводит к увеличению области воздействия на лопасть. Это в свою очередь приводит к необходимости воспроизвести как можно более точно целевую нагрузку без ущерба для достоверности результатов испытания.



1 — целевая нагрузка; *2* — фактическая испытательная нагрузка; *3* — области под воздействием приложенной нагрузки

Рисунок Е.1 — Различия распределения моментов для целевой и фактической испытательной нагрузки

Е.4 Комбинации нагружений от лопасти и в направлении, перпендикулярном к продольной оси

При статическом испытании и испытании на усталость результаты более представительны, когда применяют комбинацию нагружений от лопасти и в направлении, перпендикулярном к продольной оси. Применяя только нагружение от лопасти или только нагружение в направлении, перпендикулярном к продольной оси, результирующее напряжение и деформация и/или степень повреждения в некоторых областях будут ниже, чем целевые значения (см. приложение С).

Е.5 Радиальные нагрузки

Радиальные нагрузки на лопасти работающей установки возникают из-за гравитационных и центробежных сил. Как правило, напряжение, создаваемое радиальными силами, небольшое.

Е.6 Торсионные нагрузки

Значение торсионных расчетных нагрузок учитывают в испытательной нагрузке. Если торсионные нагрузки значимы для конструкции лопасти, то их включают в программу испытаний (см. 10.1.6.3).

Благодаря торсионным нагрузкам, приложенная двухосевая нагрузка будет в большей степени соответствовать реальной ситуации, чем одноосевая. Для типовой лопасти нагрузка от лопасти и результирующий момент смещения вдоль размаха лопасти создают торсионную нагрузку, которая увеличивается к комелю. Это соответствует реальным условиям эксплуатации.

Е.7 Условия окружающей среды

Условия окружающей среды при испытании отличаются от проектных требований. Эти условия включают в себя следующее:

- влажность;
- колебания температуры;
- УФ-излучение;
- старение;
- наличие солей;
- агрессивные среды.

Влияние окружающей среды учитывают при определении условий испытаний.

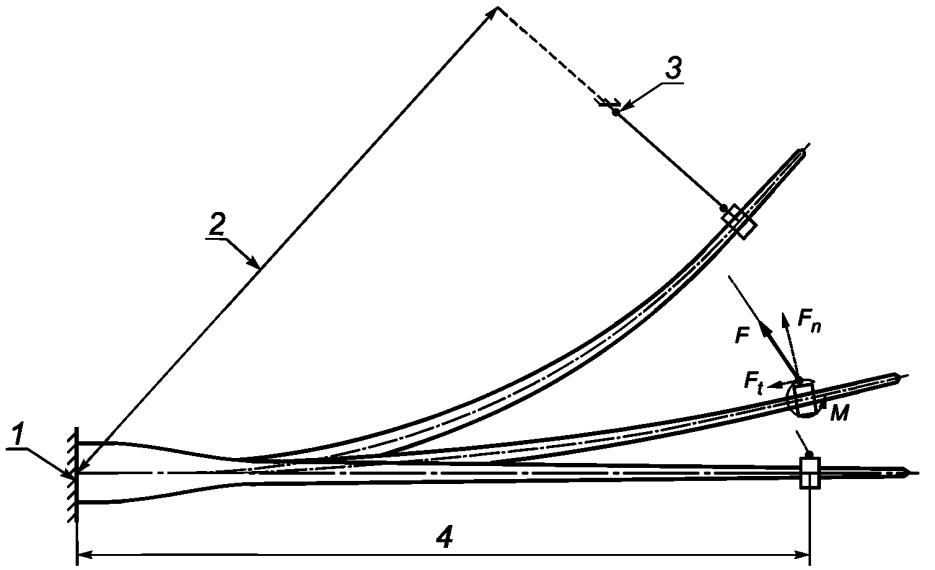
Е.8 Спектр усталостной нагрузки и последовательность

Испытание на усталость проводят ускоренным методом, в процессе которого лопасть подвергается достаточной усталостной нагрузке в разумный период времени (см. 9.4 и приложение С).

Приложение F
(справочное)

Влияние больших прогибов и направления нагрузки

Большие прогибы лопасти во время испытания вызывают изменение направления нагрузки при ее увеличении. Ограниченное расстояние между точкой приложения нагрузки и точкой закрепления лопасти может привести к тому, что угол направления нагрузки будет меняться. Изменение угла приведет к изменению момента силы в любой точке между комелем и точкой приложения нагрузки. Этот эффект схематично показан на рисунке F.1.



1 — фиксированная опора; *2* — плечо момента полной нагрузки; *3* — точка приложения нагрузки; *4* — положение без нагрузки

Рисунок F.1 — Влияние приложенных нагрузок на деформацию и угловое искривление лопасти

В случае, когда направление прилагаемой нагрузки не пересекает ось упругости лопасти, в точке приложения нагрузки создается дополнительный момент (см. рисунок F.1). Этот момент может также создавать локальную нагрузку на поверхность лопасти через оснастку.

Опоры, нагруженные неперпендикулярно к оси лопасти, при высокой нагрузке могут проскальзывать из-за тангенциальных сил (см. F_t на рисунке F.1), что может привести к дополнительной перегрузке конструкции лопасти.

Увеличение точек приложения нагрузки допускается использовать для минимизации неблагоприятных условий нагружения, особенно в области высоких нагрузок. Следует уделить внимание креплению опор, чтобы уменьшить влияние оснастки.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ ИСО/МЭК 17025—2009	IDT	ISO/IEC 17025:2005 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»
ГОСТ Р 54418.1—2012 (МЭК 61400-1:2005)	MOD	IEC 61400-1:2005 «Системы турбогенераторные ветровые. Часть 1. Требования к конструкции»
ГОСТ Р 55589—2013 (МЭК 60050-415:1999)	MOD	IEC 60050-415:1999 «Международный электротехнический словарь. Часть 415. Ветрогенераторы»
ГОСТ Р ИСО 2394—2016	IDT	ISO 2394:1998 «Основные принципы надежности конструкций»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты.

Приложение ДБ
(справочное)

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта

Таблица ДБ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта IEC 61400-23:2014
1 Область применения	1 Область применения
2 Нормативные ссылки	2 Нормативные ссылки
3 Термины, определения и обозначения	3 Термины и определения
4 Системы координат	4 Обозначения и системы координат
5 Общие принципы	5 Общие принципы
6 Документация и процедуры испытаний	6 Документация и процедуры испытаний
7 Программа и планы испытаний	7 Программа и планы испытания
8 Коэффициенты нагрузки	8 Коэффициенты нагрузки
9 Определение испытательной нагрузки	9 Определение испытательной нагрузки
10 Испытания	10 Испытания
11 Оценка результатов	11 Оценка результатов
12 Требования к протоколам	12 Требования к протоколам
Приложение А Руководящие принципы необходимости повторения статического испытания и испытания на усталость	Приложение А Руководящие принципы необходимости повторения статического испытания и испытания на усталость
Приложение В Области испытаний	Приложение В Области испытаний
Приложение С Определение испытательной нагрузки	Приложение D Определение испытательной нагрузки
Приложение D Определение числа циклов нагрузки при испытании на усталость	Приложение F Определение числа циклов нагрузки при испытании на усталость
Приложение Е Различие между расчетной и испытательной нагрузками	Приложение Е Различие между расчетной и испытательной нагрузками
Приложение F Влияние больших прогибов и направления нагрузки	Приложение С Влияние больших прогибов и направления нагрузки
Приложение ДА Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте	
Приложение ДБ Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта	

УДК 621.311.24’534.6:006.354 ОКС 27.180

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетика, установки ветроэнергетические, полномасштабные испытания на прочность, испытания лопастей ротора

БЗ 4—2019/3

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 01.04.2019. Подписано в печать 03.04.2019. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,78.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,

117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru