

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ № ИМ-21.33-09		
Ревизия 01	Дата	30.04.2025
Подготовка и проведение разгонных испытаний роторов авиационных газотурбинных двигателей		
Москва, 2025 г.		

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№	Описание изменения	Номер ревизии	Дата
1.	Введение в действие первоначального документа	01	30.04.2025
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Первоначальная редакция данных методических рекомендаций подготовлена Авиарегистром России на основе документа «Методические рекомендации по подготовке и проведению разгонных испытаний роторов авиационных газотурбинных двигателей», разработанного ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель и назначение	4
2 Нормативные ссылки и источники информации.....	5
3 Термины и определения.....	6
4 Сокращения и обозначения	8
5 Формулировки основного и связанных параграфов отечественных Норм летной годности.....	9
6 Формулировки основных параграфов зарубежных Норм летной годности и рекомендательных циркуляров к ним.....	13
7 Рекомендации циркуляров.....	15
8 Выбор условий проведения испытаний и метод определения допустимой частоты вращения ротора на разгонном стенде.....	16
9 Средства и порядок проведения испытаний.....	20

1 Цель и назначение

В настоящих методических рекомендациях изложены методы доказательства соответствия требованиям п.33.27 (а), (с), (а*), (b*) «Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбонагнетателей» АП-33 *в части подготовки и проведения сертификационных разгонных испытаний* роторов авиационных газотурбинных двигателей. Данный документ служит дополнением к рекомендательному циркуляру РЦ-АП33.27 «Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбонагнетателей».

Цель проведения испытаний – подтверждение достаточной прочности конструкции ротора в условиях, превышающих эксплуатационные нагрузки, или подтверждение запаса по несущей способности. Методические рекомендации относятся к испытаниям роторов на разгонных стендах и не относятся к испытаниям в составе двигателя. В методических рекомендациях представлены требования, предъявляемые к объекту испытаний до начала проведения испытаний, и стендовому оборудованию. Указаны средства и порядок проведения испытаний. Представлен анализ отказов, приводящих к повышению частоты вращения. Предложен метод определения зачётной частоты вращения ротора на разгонном стенде.

2 Нормативные ссылки и источники информации

- [1] Межгосударственный авиационный комитет. Авиационные правила часть АП-33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. 2012, С.86.
- [2] Рекомендательный циркуляр РЦ-АП33.27. Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбонагнетателей. - МАК, 2006.
- [3] FEDERAL AVIATION RULES. PART 33—AIRWORTHINESS STANDARDS: AIRCRAFT ENGINES., 2022
- [4] Advisory Circular No 33.27-1A, Turbine Rotor Strength Requirements. - FAA, 2011.
- [5] European Aviation Safety Agency. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines. CS-E Amendment 6, 2020, С.220.
- [6] Рекомендательный циркуляр РЦ АП-33.15-1 «Методические рекомендации по определению расчётных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов». М.: ОАО «Авиаиздат», 2013.
- [7] Metallic Materials Properties Development and Standartization (MMPDS) // Federal Aviation Administration, 2016.

3 Термины и определения

Термин	Определение
Основные детали	Детали, разрушение которых или последствия этого разрушения могут привести к опасным, связанным с двигателем, последствиям.
Одобрённые ограничения размеров (допустимые ограничения по изменению размера)	Максимально допустимые изменения размеров в разных зонах диска, которые не приводят к опасным последствиям. Эти одобренные ограничения размеров используются при обосновании выбора эксплуатационных ограничений по отношению к уровню превышения частоты вращения, указанному в документации по поддержанию летной годности, разрабатываемой в соответствии с требованиями п. 33.4 АП-33.
Запас по разрушающей частоте вращения (несущей способности)	Это отношение прогнозируемой разрушающей частоты вращения к максимально допустимой частоте вращения.
Максимально допустимая частота вращения	Наибольшая физическая частота вращения ротора, превышение которой не допускается ни на одном из установленных установившихся режимов или установленных переменных процессов в эксплуатации, включая установленные мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены.
Представительный ротор	Это испытываемый ротор или узел (включая, если это применимо, дефлекторы, проставки, устройства фиксации лопаток и т.д.), который удовлетворяет следующим критериям: - конструкция ротора соответствует той, которая должна быть сертифицирована; - свойства материала ротора и его размеры известны.
Узел вала	Это совокупность деталей, с помощью которых передается крутящий момент от узла двигателя, производящего мощность (например, турбина), к узлу двигателя, использующему эту мощность (например, компрессора, вентилятор или воздушный винт). Хотя узел

	вала передает, в основном, нагрузки кручения, он включает все вращающиеся детали независимо от того, передают эти детали крутящий момент или нет. Узел вала может включать следующие детали: - приводные валы; - зубчатые передачи; - редукторы; - консольные части ротора и др.
Зачетная частота вращения	Частота вращения, которую должен достичь представительный ротор в соответствии с требованиями п. 33.27 АП-33.

4 Сокращения и обозначения

АП-33	Авиационные правила. Часть 33
FAR-33	Federal Aviation Rules. Part 33 (<i>англ.</i>) – Федеральные авиационные правила, часть 33
FAA	Federal Aviation Agency – Федеральное авиационное агентство
EASA	European Aviation Safety Agency – Европейское агентство авиационной безопасности
АС	Advisory Circular (<i>англ.</i>) – Рекомендательный Циркуляр
CS-E	Certification Specification for Engines (<i>англ.</i>) – Инструкция к сертификации двигателей
АМС	Acceptable Means of Compliance (<i>англ.</i>) – Допустимые методы установления соответствия
ОД	Основная деталь, основные детали

5 Формулировки основного и связанных параграфов отечественных Норм летной годности

Требования по несущей способности основных деталей роторов газотурбинных двигателей регламентируются в основном параграфе п. 33.27 «Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагнетателей» АП-33 [1] и в рекомендательном циркуляре РЦ-АП33.27 «Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагнетателей» АП-33 [2].

Связанными параграфами и подразделами параграфов АП-33 являются:

- п. 33.15 (а), (b), (1*), (2*) «Материалы»;
- п. 33.19 «Прочность».
- п. 33.64А (а)(1), (а)(3) «Валы компрессора, вентилятора и турбины».

5.1 Формулировка основного параграфа

В соответствии с п. 33.27 «Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагнетателей» АП-33 [1]:

(а) Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагнетателей должны иметь достаточную прочность, чтобы выдерживать условия испытаний, установленные пунктом (с) данного параграфа.

(b) Конструкция и функционирование устройств, систем и приборов, а также методы управления двигателем, не указанные в п. 33.28, должны обеспечивать отсутствие превышений тех эксплуатационных ограничений двигателя, которые влияют на структурную целостность роторов турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагнетателей.

(с) Наиболее критически напряженная деталь ротора (кроме лопаток) каждой турбины, компрессора и вентилятора, включая цельные барабанные роторы и центробежные компрессоры двигателей или турбоагнетателей, которая определена путем анализа или другими приемлемыми методами, должна быть испытана в течение периода продолжительностью 5 мин:

(1) При ее максимальной эксплуатационной температуре, за исключением случая, изложенного ниже в п. (с)(2)(iv) данного параграфа; и

(2) При наибольшей из перечисленных частот вращения:

(i) равной 120 % ее максимально допустимой частоты вращения (максимальной частоты вращения, соответствующей установленной 2-минутной и/или установленной 30-секундной мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены), если

испытания проводятся на специальном стенде и на диске ротора смонтированы либо лопатки, либо эквивалентные по весу грузы;

(ii) равной 115 % ее максимально допустимой частоты вращения (максимальной частоты вращения, соответствующей установленной 2-минутной и/или установленной 30 секундной мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены), если испытания проводятся на двигателе;

(iii) равной 115 % ее максимально допустимой частоты вращения (максимальной частоты вращения, соответствующей установленной 2-минутной и/или установленной 30 секундной мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены), если испытания проводятся на турбоагрегате, работающем на горячем газе, который поступает от специальной установки;

(iv) равной 120 % частоты вращения, при которой в процессе холодной раскрутки в деталях ротора возникают рабочие напряжения, которые эквивалентны напряжениям, возникающим при максимальной эксплуатационной температуре и максимально допустимой частоте вращения (максимальной частоты вращения, соответствующей установленной 2-минутной и/или установленной 30-секундной мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены);

(v) равной 105 % наивысшей частоты вращения, которая возможна в результате:

(i**) отказа наиболее критического узла или системы в представительной установке двигателя при работе в ожидаемых условиях эксплуатации за исключением установленной 2-минутной и/или установленной 30-секундной мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены;

(ii**) отказа любого узла или системы в представительной установке двигателя в сочетании с любым отказом узла или системы, который обычно не может быть обнаружен при плановой предполетной проверке или во время нормальной летной эксплуатации, кроме случая, оговоренного в п. (b*) данного параграфа, при работе в ожидаемых условиях эксплуатации за исключением установленной 2-минутной и/или установленной 30 секундной мощности при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены;

(vi) наивысшей частоте вращения, которая может быть достигнута в результате отказа любого узла или системы в представительной установке двигателя, при работе в ожидаемых условиях эксплуатации, включая установленную 2-минутную и/или установленную 30-секундную мощность при одном неработающем двигателе, если они предусмотрены.

После испытания размеры каждого ротора должны находиться в пределах утвержденных для двигателя допусков в условиях превышения частоты вращения и на

деталей ротора не должно быть трещин или деформаций, которые препятствуют безопасной эксплуатации двигателя в течение возможного продолжения работы после заброса частоты вращения.

При определении рабочих режимов, применимых к каждому ротору для определения соответствия п. 33.27 АП-33, каждое из значений частоты вращения должно быть оценено в сочетании с соответствующей ему температурой и температурными градиентами в диапазоне работы двигателя.

(a*) Для испытаний должен использоваться ротор, который обладает наихудшей комбинацией свойств материалов и допусков на размеры, предусмотренных его типовой конструкцией. Если испытываемый ротор не удовлетворяет этим требованиям, то проверка структурной целостности ротора должна проводиться при отрегулированных относительно указанных в п. (с) данного параграфа параметрах, например, температуре, частоте вращения, приложенных нагрузках.

(b*) При выборе частоты вращения в соответствии с пп. (с)(2)(v) и (vi) данного параграфа должна также рассматриваться наибольшая частота вращения, возникающая в результате полной потери нагрузки ротора турбины, если нельзя показать, что этот случай является крайне маловероятным, вне зависимости от причин потери нагрузки. Должны учитываться забросы частоты вращения в результате какого-либо другого единичного отказа. Кроме того, должны учитываться забросы частоты вращения в результате множественных отказов, если не показано, что они являются крайне маловероятными.

(с*) Если наибольшая частота вращения соответствует пп. (с)(2)(v) и (vi) данного параграфа, определенной для отказного состояния, имеющего внезапный переходный характер, такого, как потеря нагрузки, и это отказное состояние препятствует дальнейшей эксплуатации поврежденного ротора, то продолжительность отказного состояния является допустимым периодом времени для демонстрации соответствия при испытании в составе двигателя.

5.2 Формулировки связанных параграфов и подразделов параграфов

В соответствии с п. 33.15 «Материалы» АП-33 [1]:

Пригодность и долговечность материалов, используемых для изготовления деталей двигателя, его систем и агрегатов, должны:

(a) Устанавливаться на основании опыта использования и/или результатов испытаний с учётом условий работы материалов в двигателе; и

(b) Соответствовать действующим стандартам, которые гарантируют прочностные

и другие свойства материалов, принятые при проектировании. Принимаемые при расчётах прочности значения характеристик материала должны соответствовать статистически обоснованным минимальным значениям характеристик, реализуемых в детали (заготовке детали);

(1*) Оцениваться с учётом влияния окружающих условий, ожидаемых в эксплуатации, технологических особенностей изготовления деталей (поверхностное упрочнение, дополнительная термическая обработка и др.).

(2*) Прочностные характеристики материалов должны определяться на основании достаточного количества испытаний, позволяющего установить статистически обоснованные расчетные значения.

В соответствии с п. 33.19 «Прочность» АП-33 [1]:

(1*) Элементы роторов двигателя, при разрушении которых не обеспечена локализация фрагментов внутри корпусов двигателя (диски, проставки, втулки и др.), должны обладать достаточной прочностью, чтобы противостоять максимальным механическим и тепловым нагрузкам, возможным в ожидаемых условиях эксплуатации.

В соответствии с п.33.64А «Валы компрессора, вентилятора и турбины» АП-33 [1]:

(а)(1) Должно быть продемонстрировано, что разрушение, рассоединение или смещение системы валов не приведет к опасным, связанным с двигателем, последствиям, за исключением случая, оговоренного в п. (а)(3) данного параграфа.

(а)(3) Если соответствие п. (а)(1) данного параграфа не достигнуто для некоторых элементов системы валов, то должно быть показано, что прогнозируемое разрушение этих элементов является крайне маловероятным событием.

6 Формулировки основных параграфов зарубежных Норм летной годности и рекомендательных циркуляров к ним

В Нормах летной годности США FAR-33 основным параграфом, соответствующим п. 33.27 АП-33 «Роторы турбин, компрессоров, вентиляторов и турбонагнетателей», является п. 33.27 FAR-33 «Turbine, compressor, fan, and turbocharger rotor overspeed» («Превышение частоты вращения роторов турбин, компрессоров и вентиляторов») [3]. П. 33.27 FAR-33 практически полностью идентичен п. 33.27 АП-33, за исключением некоторых дополнений.

Во-первых, в п. 33.27(a) FAR-33 сказано, что целостность каждого ротора можно подтвердить не только экспериментально, но и путём расчёта, или комбинацией испытания и расчёта. Общие требования к данному анализу приведены в п. 33.27(g) FAR-33. Соответствующие формулировки из п. 33.27 FAR-33 и их перевод приведены ниже.

FAR-33 п. 33.27 «Turbine, compressor, fan, and turbocharger rotor overspeed»:	FAR-33 п. 33.27 «Превышение частоты вращения роторов турбин, компрессоров и вентиляторов»:
(a) For each fan, compressor, turbine, and turbosupercharger rotor, the applicant must establish by test, analysis, or a combination of both, that each rotor will not burst when operated in the engine for 5 minutes at whichever of the conditions defined in paragraph (b) of this section is the most critical with respect to the integrity of such a rotor.	(a) Для каждого ротора вентилятора, компрессора, турбины и турбонагнетателя Заявителю следует установить <i>путем испытания, расчета или комбинации того и другого</i> , что каждый ротор не разрушится при работе в двигателе в течение 5 минут при любом из условий, определенных в пункте (b) этого раздела, которое является наиболее критичным с точки зрения целостности такого ротора.
(g) If analysis is used to meet the overspeed requirements, then the analytical tool must be validated to prior overspeed test results of a similar rotor. The tool must be validated for each material. The rotor being certified must not exceed the boundaries of the rotors being used to	(g) Если для подтверждения несущей способности используется анализ, то применяемые аналитические методы должны быть валидированы с использованием ротора аналогичной конструкции. Применимость методов должна быть показана для каждого материала. Сертифицируемый ротор не должен отличаться от роторов, используемых для валидации

validate the analytical tool in terms of geometric shape, operating stress, and temperature. Validation includes the ability to accurately predict rotor dimensional growth and the burst speed. The predictions must also show that the rotor being certified does not have lower burst and growth margins than rotors used to validate the tool.	аналитических методов, геометрически, по напряжениям и по температуре. Проверка включает в себя возможность точного прогнозирования роста размеров и разрушающей частоты вращения ротора. Прогнозы также должны показывать, что сертифицируемый ротор не имеет более низких значений запасов прочности, чем роторы, используемые для проверки аналитического метода.
--	--

Во-вторых, в п. 33.27(b)(1) – (4) FAR-33 при выборе наибольшей возможной частоты вращения, в отличие от п. 33.27(c)(1) - (2) АП-33, не конкретизируются условия проведения испытаний: на двигателе, специальном стенде, в процессе холодной раскрутки и т.д. В Нормах летной годности EASA основным параграфом, соответствующим параграфу п. 33.27 АП-33, является CS-E 840 «Rotor Integrity» («Прочность роторов») [5].

CS-E 840 и 33.27 FAR-33, а также рекомендательные циркуляры к ним (АМС Е 840 и АС 33.27-1А) гармонизированы.

7 Рекомендации циркуляров

В отечественном [2] и зарубежных [3,4] рекомендательных циркулярах изложены следующие рекомендации в части подготовки и проведения разгонных испытаний.

7.1 Температура

Заявителю следует определить температуры и температурные градиенты для проведения испытаний ротора на основании работ по термометрированию деталей двигателя или с помощью валидированного расчёта. Для компенсации любых отклонений от требуемых температур и температурных градиентов должны осуществляться корректировки частоты вращения при испытаниях или массы лопаток, или того и другого.

В соответствии с п. 33.27(с) в качестве максимальной эксплуатационной температуры ротора принимаются:

- применительно к п. 33.27(с)(2)(i), (с)(2)(ii), (с)(2)(iii) и (с)(2)(iv) температуры материала и температурные градиенты, равные наиболее неблагоприятным, которые могут быть достигнуты при работе в составе двигателя в ожидаемых условиях эксплуатации;
- применительно к п. 33.27(с)(2)(v) и п. 33.27(с)(2)(vi), температуры материала и температурные градиенты, равные наиболее неблагоприятным, которые могут быть достигнуты при работе в составе двигателя в ожидаемых условиях эксплуатации непосредственно перед отказом или отказами.

7.2 Механические свойства представительного ротора

Заявитель может определить свойства материала представительного ротора на основании испытаний образцов, вырезанных из прибыльной части диска.

При отсутствии прибыльной части диска Заявитель может установить свойства материала представительного ротора, исходя из предположения, что представительный ротор имеет средние свойства материала роторов из той же партии технологического процесса изготовления. При этом средние свойства материала должны быть определены с учётом границ доверительного интервала.

7.3 Испытание может быть продолжено до разрушения ротора после отработки требуемого периода времени путём увеличения частоты вращения до разрушения ротора. Если Заявитель выбирает этот метод проведения испытаний, то ему следует продемонстрировать, что:

- ротор первоначально испытывался при условиях, которые требуются для демонстрации соответствия требованиям п. 33.27 (с);
- требования, изложенные в п. 33.27 (с), могут быть удовлетворены с помощью одобренного метода расчёта.

8 Выбор условий проведения испытаний и метод определения допустимой частоты вращения ротора на разгонном стенде

8.1 Частота вращения ротора, обеспечивающая запас по несущей способности

Частота вращения ротора, обеспечивающая запас по несущей способности, представляет собой максимально допустимую частоту вращения ротора, умноженную на запас:

$$k \cdot n_{\max}, \quad (1)$$

В соответствии с требованиями п.33.27 (с)(2) АП-33, на основе анализа, включая анализ наивысших частот вращения в случае отказов, оговоренных в п.33.27 (с)(2)(v),(vi) АП-33, выбирается наибольшее значение произведения (1).

8.2 Анализ отказов, приводящих к повышению частоты вращения

При анализе отказов, приводящих к повышению частоты вращения ротора, согласно п.33.27 (с)(2)(v),(vi) АП-33 должны учитываться забросы частоты вращения в результате какого-либо единичного отказа (например, отказ САУ и др.). Кроме того, должны учитываться забросы частоты вращения в результате множественных отказов, если не показано, что они являются крайне маловероятными.

При выборе частоты вращения ротора должна также рассматриваться наибольшая частота вращения, возникающая в результате полной потери нагрузки ротора турбины, если нельзя показать, что этот случай является крайне маловероятным, вне зависимости от причин потери нагрузки.

При рассмотрении случаев потери нагрузки необходимо, в частности, определить наивысшую частоту вращения ротора в результате разрушения вала, для чего необходимо рассмотреть все вероятные с точки зрения разрушения зоны вала. При этом, необходимо учитывать все условия, оговоренные в требованиях Норм летной годности [1]. Когда определена наивысшая частота вращения, Заявитель должен продемонстрировать, что диски турбины имеют запас по разрушающей частоте не менее 5% над этой наивысшей частоты вращения. При определении наивысшей частоты вращения необходимо рассматривать разрушение вала в любой зоне системы валов [2].

Определение наивысшей частоты вращения должно рассматриваться с учетом следующих факторов:

- инерция системы;
- располагаемая энергия газа (момент газовых сил);
- смещение ротора;
- работа устройств защиты от превышения частоты вращения.

Если при определении максимальной частоты вращения Заявитель планирует исключить некоторые элементы или участки вала, то подтверждение исключения производится в соответствии с процедурами при выполнении работ по п.33.64А. В частности, Заявителю необходимо показать, что:

- элементы вала удовлетворяют требованиям п.33.14;
- материал, из которого изготавливается вал, и конструктивные особенности вала хорошо известны, а напряженно-деформированное состояние определено с помощью проверенных расчетно-экспериментальных методов;
- используемые методы анализа отказов достаточно обоснованы;
- учтены любые допущения относительно установки двигателя на воздушном судне;
- определить и рассмотреть все возможные отказы, способные привести к превышению частоты вращения.

При определении возможных отказов необходимо рассмотреть следующие и не только следующие события:

- износ тел качения в подшипнике, приводящий к прецессированию вала и его контакту с другими деталями. Влияние на разрушение вала отказа подшипника и желательное обеспечение обнаружения такового отказа обычными при техническом обслуживании средствами и/или аппаратурой в полете. Следует рассмотреть возможность изоляции подшипника от вала и, таким образом, повысить устойчивость системы к повреждениям (применение бампера, нанесение ТЗП);
- дисбаланс, в том числе вследствие обрыва лопатки компрессора/турбины, приводящий к трению вала о другие детали;
- коррозия участков вала, влияние смазки и/или покрытий на скорость коррозии участков вала;
- резонансные колебания вала, в том числе вследствие нестабильной работы топливной системы;
- масляный пожар (например, при попадании топлива в масло в топливно-масляном теплообменнике);
- воздействие на участок вала горячего воздуха (газа) (например, при прорыве газа из газовоздушного тракта из-за дефекта уплотнения);

- разрушение от усталости от концентраторов напряжений, обусловленных особенностями конструкции вала и/или технологией изготовления;
- потеря смазки в шлицевых соединениях;
- трение вала о другую деталь, в том числе после деформации или разрушения последней, включая ситуацию после срабатывания устройства для снижения нагрузок при обрыве лопатки вентилятора. При определении зон разрушения вала необходимо выполнить анализ конструкции и, в частности, оценить:
 - возможное влияние скрытых необнаруженных производственных дефектов, в том числе дефектов материала;
 - влияние допусков в пределах чертежа при изготовлении;
 - трение между участком вала, находящимся под моментной нагрузкой, и прилегающими поверхностями (такими как поверхности других валов, воздушных и масляных уплотнений) в том числе после разрушения отдельных деталей, приводящее к перегреву и снижению прочности участка вала;
 - воздействие на вал любого возможного возгорания двигателя и необходимость обеспечения раннего предупреждения о любых внутренних пожарах, которые могут произойти;
 - детали, отклонение которых от допусков при изготовлении потенциально может привести к возгоранию, и установление контроля для изготовления таких деталей;
 - влияние на вал нагрузок, которые могут передаваться при ударном воздействии, например, в результате попадания в двигатель птиц, обрыва лопаток и т.д.;
 - возможную потерю смазки в шлицевых соединениях.

8.3 Определение зачётной частоты раскрутки испытательного ротора

8.3.1 Как правило, испытательный ротор не обладает наихудшей комбинацией свойств материалов и допусков на размеры, а условия его нагружения в составе стенда могут отличаться от эксплуатационных. Для обеспечения выполнения требований п.33.27 (а*) испытательная частота вращения может определяться с учетом поправочных коэффициентов C и D :

$$n_{\text{и}} = k \cdot n_{\text{max}} \cdot C + D, \quad (2)$$

где

C – поправочный коэффициент, учитывающий наихудшую комбинацию свойств материала и допусков на размеры, а также несоответствие условий нагрева испытательного

ротора эксплуатационным тепловым условиям ротора в составе двигателя:

$$C = \frac{n_{\text{разр}}^{\text{стенд}}}{n_{\text{разр}}^{\text{двиг}}}, \quad (3)$$

где

$n_{\text{разр}}^{\text{стенд}}$ – расчетное значение разрушающей частоты вращения испытательного ротора, определенное по средним механическим свойствам материалов деталей, входящих в состав испытательного ротора, при условиях нагрева на разгонном стенде (при наличии) и при учете номинальных геометрических размеров всех деталей;

$n_{\text{разр}}^{\text{двиг}}$ – расчетное значение разрушающей частоты вращения ротора двигателя, определенное по статистически минимальным механическим свойствам материалов деталей, входящих в состав ротора двигателя, при наиболее неблагоприятных условиях нагрева ротора в составе двигателя и при учёте наиболее неблагоприятного сочетания допусков на размеры.

Наиболее неблагоприятное сочетание допусков на размеры и свойства материала необходимо рассматривать для всех деталей ротора, которые могут повлиять на уровень напряжений (например, лопатки, сопрягаемые детали).

D – поправочный коэффициент, учитывающий погрешность измерительной аппаратуры и погрешность поддержания частоты вращения разгонного стенда.

8.3.2 Расчётные значения разрушающих частот вращения должны быть определены на основе трёхмерного моделирования процесса деформации ротора с учетом физической и геометрической нелинейностей, а также на основании обоснованного критерия разрушения. Для моделирования процесса деформации ротора рекомендуется использовать метод конечных элементов. Обоснованность использования допущений при решении нелинейной задачи и критерия разрушения должна быть продемонстрирована на примере разгонных испытаний модельных или натурных дисков, близких по конструкции и материалам.

При определении $n_{\text{разр}}^{\text{стенд}}$ в расчёте необходимо использовать кривые упрочнения материала, построенные по средним значениям диаграмм растяжения в диапазоне температур испытаний ротора. Для получения диаграмм растяжения каждой детали ротора рекомендуется использовать результаты испытаний на растяжение не менее 3-х образцов (для каждого уровня температуры), вырезанных из прибыльной части заготовки детали, а при отсутствии прибыльной части руководствоваться рекомендациями п.7.2 настоящих методических рекомендаций.

При определении $n_{\text{разр}}^{\text{двиг}}$ в расчёте необходимо использовать кривые упрочнения материала, построенные по статистически минимальным диаграммам растяжения. Рекомендуется использовать результаты испытаний на растяжение, полученные при проведении специальной квалификации материала с учетом требований циркуляра РЦ-33.15-1 [6].

Рекомендации по построению средних и статистически минимальных диаграмм растяжения материала приведены в приложении А.

Учет неблагоприятного сочетания допусков также может быть учтен консервативным способом за счет введения в формулу (3) дополнительного коэффициента:

$$C = 1,03 \cdot \frac{n_{\text{разр}}^{\text{стенд}}}{n_{\text{разр}}^{\text{двиг}}} \quad (4)$$

В этом случае $n_{\text{разр}}^{\text{двиг}}$ определяется по номинальным геометрическим размерам деталей.

Все допущения расчетного метода должны быть консервативными.

9 Средства и порядок проведения испытаний

9.1 Общие положения

9.1.1. Объектом испытаний является представительный ротор, который может представлять собой как ротор типовой конструкции целиком, так и отдельно наиболее нагруженный узел или деталь ротора типовой конструкции. При выборе в качестве объекта испытаний узла или детали ротора должно быть выполнено обоснование. Наиболее нагруженный узел или деталь в составе ротора рекомендуется выбирать по критерию минимального значения разрушающей частоты вращения, определенного расчетным путем с учетом рекомендаций п.8.3.2. Если нет возможности расчетным путем определить наиболее нагруженный узел или деталь в роторе, то необходимо проводить испытания всего ротора или каждой детали ротора по отдельности.

9.1.2. Для особо сложных и принципиально новых конструкций, материалов и технологий изготовления проведение разгонных испытаний является обязательным.

9.1.3. Конструкция и технология изготовления объекта испытания должны соответствовать типовой конструкции. При наличии незначительных отклонений конструкции и/или технологии изготовления объекта испытаний от типовой конструкции необходимо подтвердить, что отклонения не могут повлиять на результат.

9.1.4. При использовании имитаторов лопаток необходимо обеспечить воспроизведение ими центробежных нагрузок, создаваемых лопатками.

9.1.5. Конструкция переходных деталей (оснастка) крепления объекта испытаний к разгонному стенду должна обеспечивать воспроизведение податливости фланцевого соединения объекта и не должна являться первой в отношении иерархии разрушения деталей объекта испытаний, что подтверждается расчетами.

9.1.6. Для выбранного объекта возможно использование расчетного метода для подтверждения удовлетворения требований к превышению частоты вращения только в том случае, если подтверждено соответствие результатов расчета экспериментальным данным, полученным на роторе-прототипе. Ротор считается прототипом, если он не имеет существенных отличий в отношении геометрии, температур и уровня рабочих напряжений и не имеет отличий в отношении используемых материалов и технологий изготовления. Кроме того, расчетом должно быть показано, что ротор имеет запасы по разрушающей частоте и по радиальным удлинениям выше, чем ротор, результаты испытаний которого использованы для подтверждения возможности применения расчетного метода.

9.1.7. При необходимости, предусматривается дополнительная подгрузка имитатором сопрягаемой детали.

9.2 Требования к испытательному оборудованию

Испытательная лаборатория, где проводятся испытания, должна быть аккредитована Росавиацией в соответствии с требованиями ФАП-21. Испытательный стенд и стендовые системы должны быть аттестованы в соответствии с ГОСТ Р 8.568-2017.

Объем и порядок проведения испытаний указывается в программе испытаний, согласованной с сертификационным центром.

9.3 Оценка результатов испытаний

9.3.1. Результаты испытаний фиксируются в протоколах и в системе сбора данных.

9.3.2. Результаты испытаний могут быть использованы для выполнения валидации расчетов. После разборки, дефектации и признания испытаний зачетными, испытания могут быть продолжены до разрушения объекта испытания по согласованию с Авиационными властями (Росавиация).

9.3.3. Испытания признаются зачётными, если размеры ротора после испытаний находятся в пределах утвержденных для двигателя допусков в условиях превышения частоты вращения и на деталях ротора не должно быть трещин или деформаций, которые препятствуют безопасной эксплуатации двигателя в течение возможного продолжения работы после заброса частоты вращения [1].

9.4 Требования к документации

Состав документации, предъявляемой на испытания:

9.4.1. Техническая справка с обоснованием выбора объекта испытаний и определением условий проведения испытаний;

9.4.2. Программа испытаний.

9.4.3. Методика проведения испытаний.

Приложение А

В данном приложении представлен алгоритм статистической обработки экспериментальных диаграмм растяжения, который направлен на получение средних и статистически минимальных расчетных кривых деформирования. Основным принципом работы алгоритма является статистическая обработка напряжений на единой относительной шкале. Это достигается за счет приведения значений массива деформаций на диаграмме растяжения каждого образца к отрезку относительной шкалы $X=[1\dots 2]$. При этом значение деформации $X=1$ на относительной шкале должно соответствовать деформации $\varepsilon=\varepsilon(\sigma_{mц})$ в экспериментальной диаграмме растяжения, а значение деформации $X=2$ на относительной шкале должно соответствовать деформации $\varepsilon=\varepsilon(\sigma_B)$ в экспериментальной диаграмме растяжения (рисунок А-1).

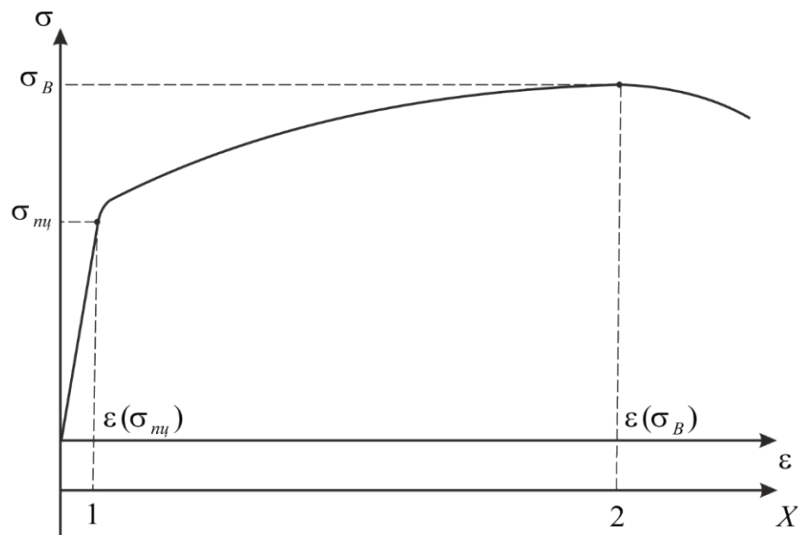


Рисунок А-1 - Диаграмма растяжения образца с абсолютными (ε) и относительными (X) деформациями

В результате реализации данного подхода получается среднеквадратическое отклонение (СКО) значений массива напряжений (функция СКО), характеризующее разброс этих напряжений при любом уровне упругопластического деформирования образца.

Общая блок-схема предлагаемого подхода представлена на рисунке А-2.

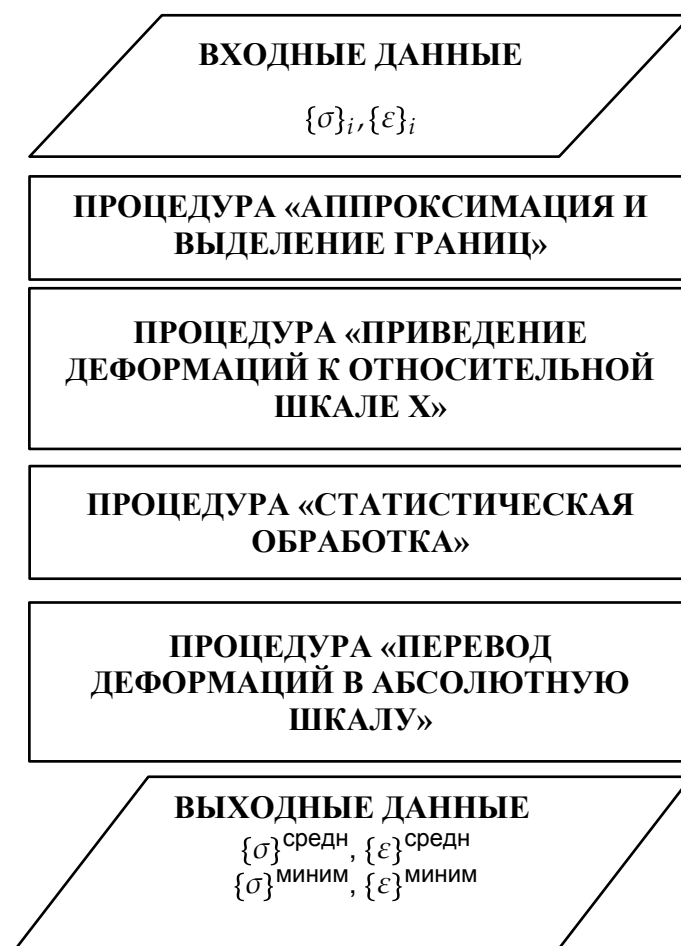


Рисунок А-2 – Общая блок-схема алгоритма статистической обработки экспериментальных диаграмм растяжения

Входные данные

Экспериментальная диаграмма растяжения каждого образца при одном уровне температур и скорости нагружения в виде массива данных $\{\sigma, \varepsilon\}_i$, где $i=1, 2, \dots, n_p$; i – номер образца; n_p – объем выборки испытанных образцов.

Процедура «аппроксимация и выделение границ»

Для каждого i -го образца (далее индекс i опущен) выполняется аппроксимация напряжений кусочно-линейной функцией, исключающей выбросы и сглаживающей локальные экстремумы, характерные, например, при проявлении эффекта скачкообразной пластической деформации.

Статистическая обработка значений напряжений $\{\sigma\}$ выполняется в диапазоне, соответствующем диапазону $[\varepsilon_{\text{пц}} \dots \varepsilon_{\text{в}}]$ деформаций $\{\varepsilon\}$, где $\varepsilon_{\text{пц}}$ – деформация, соответствующая пределу пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ ($\sigma_{\text{пц}}$ определяется с допуском на увеличение тангенса угла наклона на 5 % в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»); $\varepsilon_{\text{в}}$ – деформация, соответствующая максимальному значению напряжений на диаграмме растяжения после ее аппроксимации.

Процедура «приведение деформаций к относительной шкале X»

Задание шкалы $X=[1, 1+h, 1+2h, \dots, 2]$ с равномерным шагом h , $1/h$ – целое число.

Для каждого i -го образца выполняется приведение значений деформаций $\{\varepsilon\}$ в диапазоне $[\varepsilon_{\text{пц}} \dots \varepsilon_{\text{в}}]$ к шкале X . При этом значение деформации $X=1$ на относительной шкале должно соответствовать деформации $\varepsilon_{\text{пц}}$ в экспериментальной диаграмме растяжения, а значение деформации $X=2$ на относительной шкале должно соответствовать деформации $\varepsilon_{\text{в}}$ в экспериментальной диаграмме растяжения. Для каждого значения шкалы X определяются соответствующие значения напряжений $\{\sigma\}_X$ линейной интерполяцией по диаграмме растяжения.

Процедура «статистическая обработка»

Определяются (по аналогии со статистической обработкой стандартных механических характеристик, представленной в Рекомендательном циркуляре РЦ-АП-33.15-1 [6]):

- значения средних $\{\sigma\}^{\text{средн}}$, СКО $\{S_{\sigma}\}$ и минимальных $\{\sigma\}^{\text{миним}}$ напряжений на шкале X ;
- значения средней $\varepsilon_{\text{в}}^{\text{средн}}$, СКО $S_{\varepsilon_{\text{в}}}$ и минимальной $\varepsilon_{\text{в}}^{\text{миним}}$ деформации.

Процедура «перевод деформаций в абсолютную шкалу»

Выполняется перевод значений шкалы X к шкале деформаций $\{\varepsilon\}^{\text{средн}}$ в диапазоне $[\varepsilon_{\text{пц}}^{\text{средн}} \dots \varepsilon_{\text{в}}^{\text{средн}}]$. При этом значение деформации $\varepsilon_{\text{пц}}^{\text{средн}}$ на кривой деформирования должно соответствовать деформации $X=1$ на относительной шкале, а значение деформации $\varepsilon_{\text{в}}^{\text{средн}}$ на кривой деформирования должно соответствовать деформации $X=2$ на относительной шкале.

Выходные данные

Статистически средняя кривая деформирования в виде массива данных $\{\sigma\}^{\text{средн}}$, $\{\varepsilon\}^{\text{средн}}$ и статистически минимальная кривая деформирования $\{\sigma\}^{\text{миним}}$, $\{\varepsilon\}^{\text{миним}}$,

- где $\{\varepsilon\}^{\text{средн}}$ – деформации в диапазоне $[\varepsilon_{\text{пц}}^{\text{средн}} \dots \varepsilon_{\text{в}}^{\text{средн}}]$;
- $\{\sigma\}^{\text{средн}}$ – напряжения в диапазоне $[\sigma_{\text{пц}}^{\text{средн}} \dots \sigma_{\text{в}}^{\text{средн}}]$;
- $\{\varepsilon\}^{\text{миним}}$ – деформации $\{\varepsilon\}^{\text{средн}}$ в диапазоне $[\varepsilon_{\text{пц}}^{\text{средн}} \dots \varepsilon_{\text{в}}^{\text{миним}}]$;
- $\{\sigma\}^{\text{миним}}$ – напряжения в диапазоне $[\sigma_{\text{пц}}^{\text{миним}} \dots \sigma(\varepsilon_{\text{в}}^{\text{миним}})]$.

При реализации такого подхода для средней диаграммы растяжения будет выполнено требование $\sigma(\varepsilon_{\text{в}}^{\text{средн}}) = \sigma_{\text{в}}^{\text{средн}}$, где $\sigma_{\text{в}}^{\text{средн}}$ – среднее значение предела прочности. Для минимальной диаграммы растяжения $\sigma(\varepsilon_{\text{в}}^{\text{миним}}) < \sigma_{\text{в}}^{\text{миним}}$, где $\sigma_{\text{в}}^{\text{миним}}$ – статистически минимальное значение предела прочности, что «идет в запас».

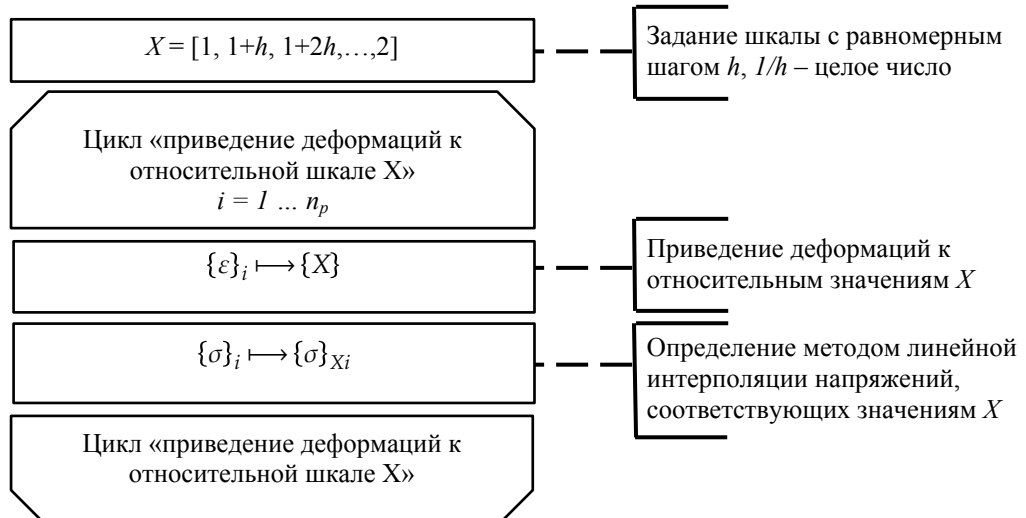
На рисунке А-3 представлены блок-схемы основных процедур алгоритма. В процедуре «приведение деформаций к относительной шкале X » рекомендуется выбирать шаг h в диапазоне от 0,001 до 0,0001.

В процедуре «статистическая обработка» значение квантиля распределения Гаусса U_p выбирается с учетом рекомендаций РЦ-АП-33.15-1: для расчетов основных деталей $U_p=3$. В случае, если число образцов меньше 30, следует определять минимальные значения механических характеристик с вероятностью неразрушения 99% при доверительной вероятности 95% (99/95) в соответствии с данными таблицы 9.10.1 [7].

Для расчёта деталей, не отнесенных к категории основных, разрушение которых может вызвать выключение в полёте двигателя многодвигательного летательного аппарата и (или) привести к значительному экономическому ущербу, принимается $U_p=2$. В этом случае, если число образцов меньше 18, следует определять минимальные значения механических характеристик с вероятностью неразрушения 90% при доверительной вероятности 95% (90/95) в соответствии с данными таблицы 9.10.1 [7].

Примеры работы алгоритма применительно к титановому и никелевому сплавам для дисков газотурбинного двигателя представлены на рисунках А-4 и А-5.

Процедура «приведение деформаций к относительной шкале X»



Процедура «статистическая обработка»



Процедура «перевод деформаций в абсолютную шкалу»

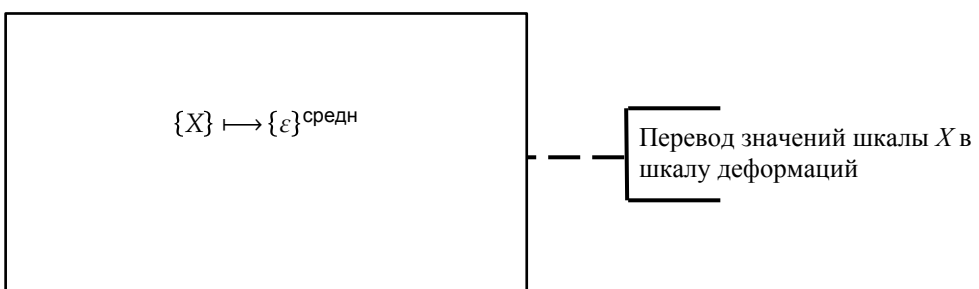
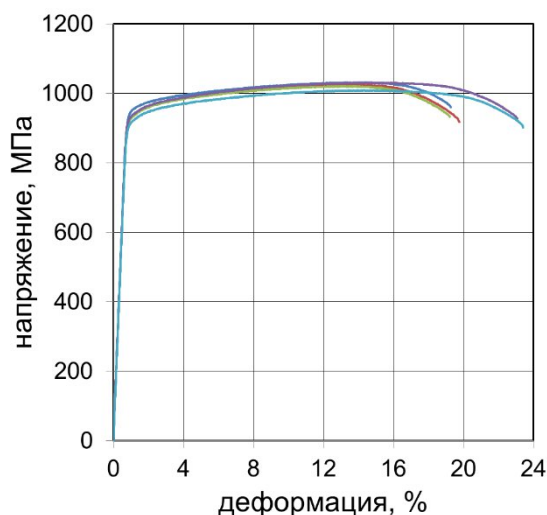
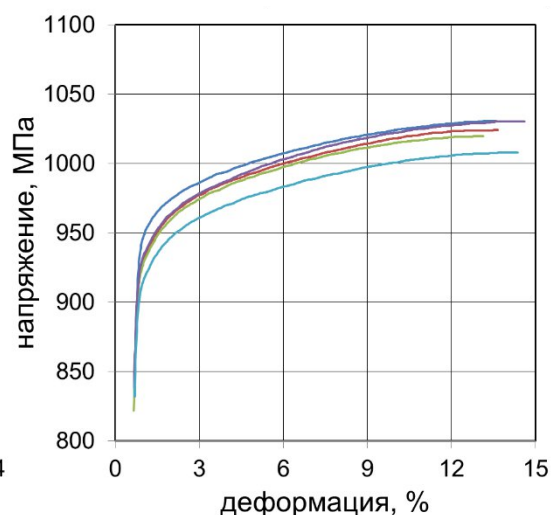


Рисунок А-3 – Блок-схемы основных процедур алгоритма

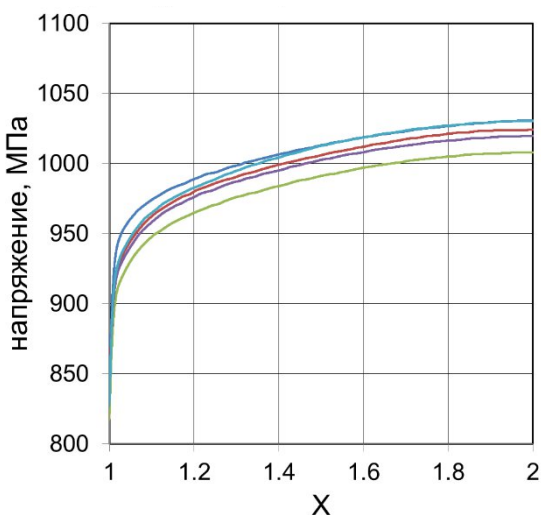


а) входные данные

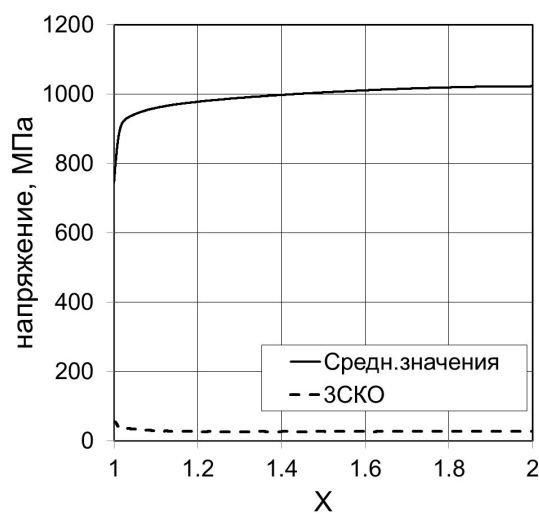


б) процедура

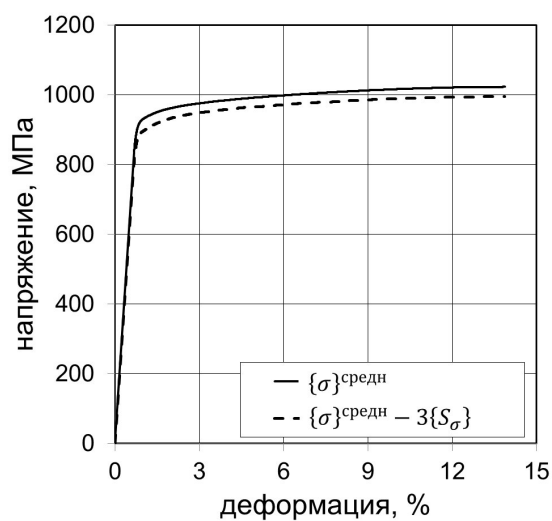
«аппроксимация и выделение границ»



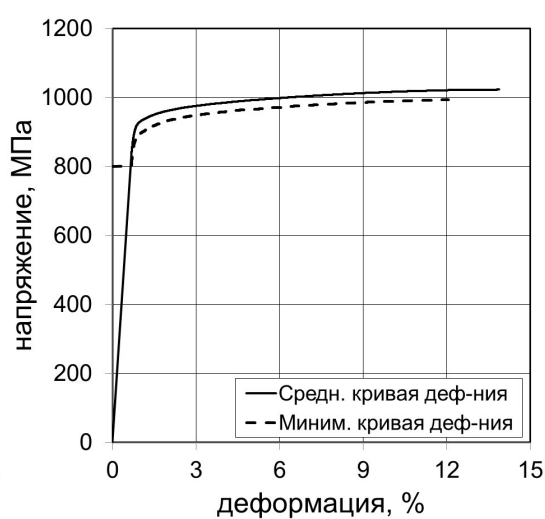
в) процедура «приведение деформаций к относительной шкале X»



г) процедура «статистическая обработка»

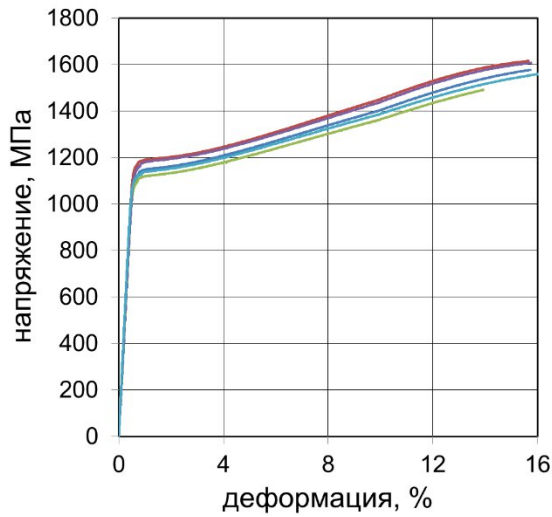


д) процедура «перевод деформаций в абсолютную шкалу»

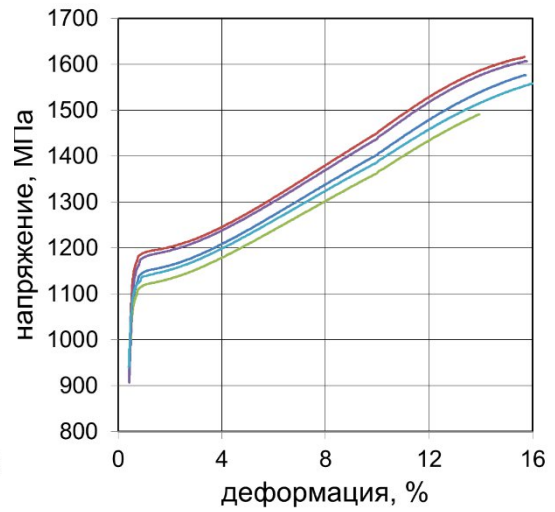


е) выходные данные

Рисунок А-4 – Пример реализации алгоритма статистической обработки экспериментальных диаграмм растяжения титанового сплава ($n_p=5$, $U_p=3$, $h=0,0001$)

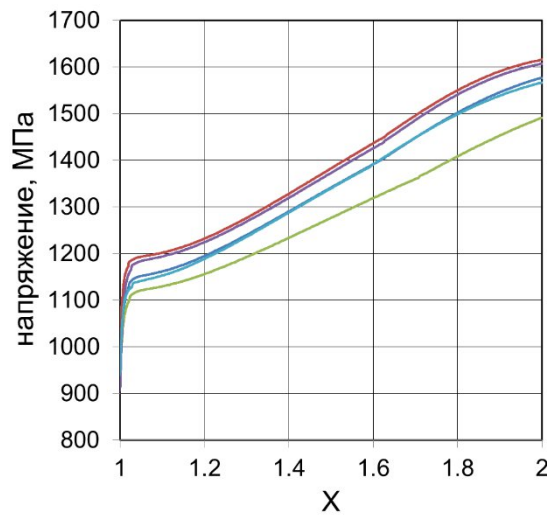


а) входные данные

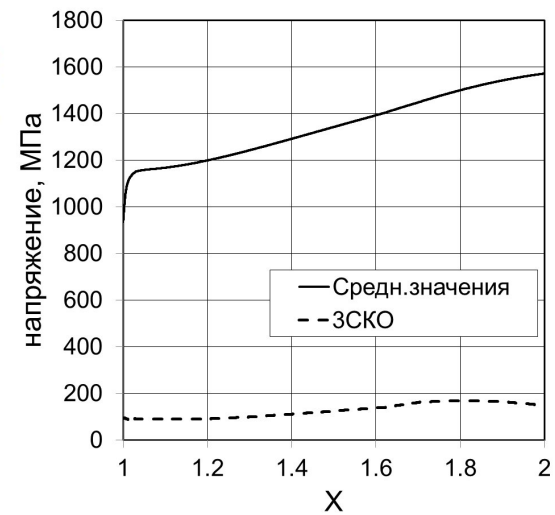


б) процедура

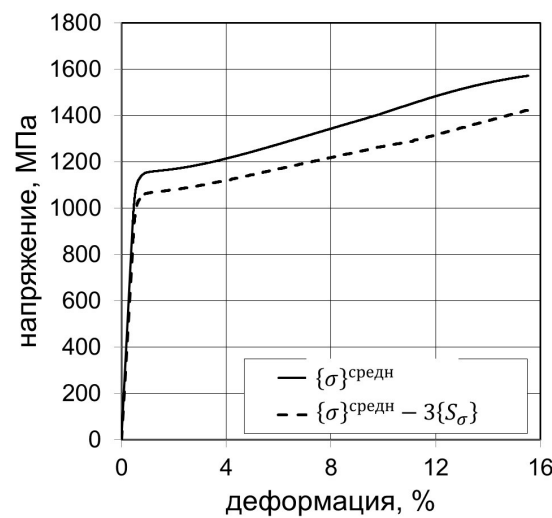
«аппроксимация и выделение границ»



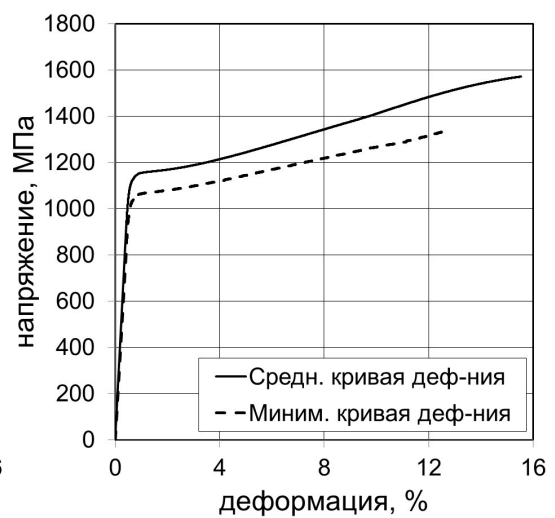
в) процедура «приведение деформаций к относительной шкале X»



г) процедура «статистическая обработка»



д) процедура «перевод деформаций в абсолютную шкалу»



е) выходные данные

Рисунок А-5 – Пример реализации алгоритма статистической обработки экспериментальных диаграмм растяжения никелевого сплава ($n_p=5$, $U_p=3$, $h=0,0001$)