

Научная статья

УДК 614.841.345:629.7.042.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-110-120

## О ГОРЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ИХ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

С.Л. Барботько<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Титан имеет высокую температуру плавления, низкую плотность и высокие механические характеристики, поэтому находит широкое применение в аэрокосмической технике. Проанализированы характеристики пожарной опасности титана, актуальность проведенных работ и экспериментальные методы оценки. Установлено, что отсутствуют стандартизованные методы испытаний на пожаробезопасность, вследствие этого полученные результаты несопоставимы. Рассмотрены основные требования, которым должен соответствовать испытательный стенд, предназначенный для оценки пожарной опасности образцов, выполненных из титановых сплавов.

**Ключевые слова:** титан, титановые сплавы, пожарная опасность, горение, методы испытания, испытательное оборудование

**Для цитирования:** Барботько С.Л. О горении титановых сплавов и методах оценки их пожарной опасности // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-110-120.

Scientific article

## ABOUT COMBUSTION OF TITANIUM ALLOYS AND METHODS OF ASSESSMENT OF THEIR FIRE HAZARD

S.L. Barbotko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Titanium has high melting point, low density and high mechanical properties, therefor it finds broad application in space engineering. The fire hazard characteristics of titanium, relevance of performed works and experimental methods of assessment are analyzed. It is established that there are no standardized test methods on fire hazard for samples of titanium alloys, as a result the obtained results are incomparable. The main requirements to which there has to correspond the test stand intended for assessment of fire hazard of samples made of titanium alloys are analyzed.

**Keywords:** titanium, titanium alloys, fire hazard, combustion, test methods, test equipment

**For citation:** Barbotko S.L. About combustion of titanium alloys and methods of assessment of their fire hazard. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-110-120.

## Введение

В настоящее время титановые сплавы благодаря их высоким удельным прочностным характеристикам и относительно высокой термостойкости находят широкое применение в промышленности для изготовления конструкций различного назначения. Однако периодически регистрируются случаи воспламенения титановых деталей, приводящие к развитию высокоинтенсивного (с высокой температурой горения) пожара, при котором основным окисляемым компонентом (топливом) является именно титан – происходит возникновение и развитие так называемого «титанового пожара». В связи с вышеизложенным представляет интерес проанализировать имеющиеся сведения по случаям возникновения титановых пожаров, горению образцов титана и его сплавов, оценить их пожарную опасность и определить наиболее перспективные методы испытаний, обеспечивающие возможность получения данных, позволяющих как сопоставлять различные составы между собой, так и оценивать пожаробезопасность деталей в предполагаемых условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках реализации научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов и неразрушающий контроль» комплексной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–3]) и при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

## Анализ пожарно-технических характеристик титана

Основополагающие исследования по процессам окисления и горения титана выполнены во время его внедрения как конструкционного материала в аэрокосмическую технику, т. е. в 60–80 гг. XX в.

Титан имеет температуру плавления 1650–1800 °С, сравнительно низкую плотность (4,5 г/см<sup>3</sup>) и высокие удельные механические свойства [4–6], вследствие чего применяется в качестве конструкционного материала в авиационной и космической отраслях. В авиационной отрасли сплавы на основе титана находят широкое применение для изготовления элементов шасси, деталей двигателей, огнепреграждающих перегородок, внешней обшивки фюзеляжа, рулевых и несущих поверхностей крыла.

Однако титан также обладает высокой химической активностью – является пирофорным горючим, вследствие чего интенсивно реагирует как с различными традиционными (кислород, галогены) окислителями, так и с веществами и соединениями, обычно не рассматриваемыми в качестве окислителей, такими как угарный и углекислый газы, вода, сероводород, водород, азот и другие химические соединения, способные являться акцепторами электронов, в том числе газы и жидкости, традиционно используемые для тушения пожара (фреоны, хладоны) [7]. По удельной теплоте сгорания титан входит в первую пятерку металлов, выделяющих при окислении наибольшее количество тепла, таких как бериллий, литий, алюминий, магний и титан [8]. Вследствие большой теплоты сгорания титана (теплота образования TiO<sub>2</sub> (рутила) составляет 225,6 ккал/моль) и высокой скорости процесса, температура при горении титана на воздухе составляет >3000 °С, что превышает температуру водородно-кислородного пламени (2800 °С) [4, 9].

Первичный процесс окисления титана происходит уже при обычных (комнатных) условиях (температура окружающей среды 20 °С, давление 1 ат (0,1 МПа), концентрация кислорода в воздухе 21 %), однако дальнейшему активному окислению препятствует образование на поверхности материала плотной пленки из оксидов, препятствующей дальнейшему доступу кислорода. Быстрое образование большой площади

чистой (ювенильной) поверхности (например, в случае разрушения образца или трения), особенно в условиях повышенных температур и атмосферного давления, приводит к высокоинтенсивному окислению и выделению большого количества тепла, обеспечивающего резкий рост температуры. Вследствие высоких температур резко возрастают скорости диффузии кислорода в окалине и из окалины к фронту реакции, а также непосредственно скорость самой реакции окисления.

Высокая температура плавления титана обусловила возможность его применения в теплонапряженных условиях – для изготовления деталей компрессора авиационных двигателей или обшивок внешнего контура сверхзвуковых самолетов и ракетной техники. Однако высокая реакционная способность титана изначально вызывала опасения по поводу его значительной пожарной опасности. Так, например, в начале 1960-х гг. в США действовала программа по созданию пассажирского сверхзвукового самолета SST (supersonic transport), предназначенного для полетов со скоростью до 2,7 Маха. Внешний корпус этого самолета планировалось выполнить целиком из титановых сплавов, но были опасения, что в случае авиационных происшествий, сопровождающихся возникновением пожара, может загореться титан, произойдет разрушение корпуса и выживание людей станет невозможным. Однако проведенные натурные огневые испытания отсека фюзеляжа показали, что даже в условиях высокоинтенсивного пожара от разлившегося углеводородного топлива возгорания титана не происходит, а во внутренних отсеках сохраняется температура, обеспечивающая выживание людей [10, 11].

После этих испытаний для защиты от пожара в пожароопасных зонах стали активно применять в качестве огнепреграждающих перегородок листы из титановых сплавов. Согласно АМС 25.1181 Designated fire zones [12], для изготовления огнепреграждающих перегородок (файберволов) используют листы из нержавеющей стали толщиной не менее 0,4 мм, стальные листы с антикоррозионным покрытием толщиной не менее 0,45 мм или листы из титановых сплавов толщиной не менее 0,45 мм.

### **Анализ авиационных происшествий с наличием титанового пожара**

Для выяснения важности и актуальности данной проблемы и оценки необходимости постановки НИР по воспламеняемости титановых сплавов и титановым пожарам проведен поиск в открытой печати научно-технических литературных источников. Проанализированы также данные Авиационного регистра Международного авиационного комитета (АР МАК) за период с 1992 по 2024 г. и отдела пожарной безопасности Технического центра Федеральной авиационной администрации (ТС FAA) США с 1960 по 2024 г.

По результатам выполненного АР МАК анализа авиационных происшествий и катастроф с гражданской авиационной техникой за период с 1992 по 2024 г. титановый пожар в причинах не указан. Однако возгорание титана вследствие разрушения лопаток компрессора авиационного двигателя или трения титана о бетонное покрытие при поломке шасси событие достаточно распространенное. Например, пожар самолета Fokker 100 вследствие поломки шасси, произошедший в Тегеране 19 марта 2019 г., или возгорание двигателя самолета Ту-204, летевшего по маршруту «Уфа – Сочи» 22 августа 2018 г., а также возгорание двигателя самолета Boeing B-737 при аварийной посадке 1 сентября 2018 г. в аэропорту Сочи. В упомянутых случаях искрообразование и горение титана – это скорее источники воспламенения, приводящие к горению углеводородного топлива, нежели к непосредственно титановому пожару. В Росавиации все же считают, что причиной отказа двигателя Ту-204 во время полета стал титановый пожар [13]. Согласно той же публикации, титановый пожар в двигателе стал причиной катастрофы самолета Ту-154 под Красноярском.

### **Анализ основных направлений зарубежных работ по испытаниям титана на пожаробезопасность**

В статье [14] проанализированы основные направления работ, выполняемых зарубежными исследователями, по повышению пожарной безопасности современной авиационной техники. Однако работы по испытаниям титановых сплавов среди них отсутствуют. Более чем из 1000 документов, находящихся в открытом доступе на сайте отдела пожарной безопасности Технического центра Федеральной авиационной администрации (ТС FAA) США, всего только шесть документов связаны с одновременно встречающимися словами «титан» и «огонь». При этом четыре документа относятся к оценке эффективности титана в качестве огнепреграждающих перегородок и подтверждению способности сдерживать мощный внешний пожар от разлившегося топлива. Только два документа посвящены оценке воспламеняемости титана, используемого в компрессоре авиационных двигателей [9, 15].

В этих работах отмечается следующее: титановые пожары в двигателях явление чрезвычайно редкое, в двигателях гражданских самолетов эти пожары вообще не отмечены вследствие «мягкого» режима эксплуатации, в военных двигателях они случаются, как правило, вследствие напряженных режимов маневрирования. Рассматриваются аспекты причин возникновения титанового пожара, его характеристики и методы предупреждения. Воспламенение титана в двигателе (компрессоре) происходит, как правило, вследствие следующих причин:

- трение титановой лопатки об обечайку;
- попадание твердого предмета в компрессор, вызывающее местный перегрев вследствие трения.

Первая причина вызвана ошибками при конструировании двигателя – малые зазоры, недостаточная жесткость обечайки, неудачная конструкция уплотнений.

Даже при наличии второй причины воспламенение происходит не всегда и определяется условиями теплоотвода – скоростью воздушного потока, геометрической формой пера лопатки. При больших скоростях воздушного потока неконтролируемого горения не происходит, так как осуществляется охлаждение местного перегрева, а также сдув и распыление расплавленного металла.

Во время полета для тушения загоревшегося двигателя применяется его выключение, температура и давление воздуха снижаются, вследствие этого, как правило, происходит прекращение горения титана. Для тушения горящего титана можно применять воздушную среду с 60 % аргона. Использование углекислого газа или хладона (фреон) неэффективно, они могут только интенсифицировать горение. Однако в случае разрушения топливо- и маслопроводов и загорания горючих жидкостей применение хладонов необходимо для тушения углеводородного пожара в мотогондоле.

Неконтролируемое горение можно предотвратить путем грамотного конструирования (например, достаточно толстое перо лопатки обеспечивает необходимый теплоотвод) или применения специальных термостойких покрытий, предотвращающих воспламенение пера лопатки или обечайки при попадании капель раскаленного расплава. В этих условиях происходит самопроизвольное погасание воспламенившегося участка детали из титана.

### **Анализ отечественной и зарубежных нормативных баз, а также иных научно-технических литературных источников по методам испытаний образцов из титановых сплавов на пожаробезопасность**

Одно из направлений повышения безопасности авиационных двигателей – применение сплавов с улучшенными характеристиками по пожаробезопасности.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводятся разработка и квалификация новых титановых сплавов [16–21], при этом необходимо проводить испытания по определению критических условий их воспламеняемости.

Проанализированы базы отечественных (ГОСТ и ГОСТ Р – система NORMA CS) и зарубежных стандартов (база Американского общества испытаний и материалов – ASTM, международных стандартов – ISO).

Проведенный анализ отечественных и зарубежных нормативных документов не выявил ни одного стандарта на метод оценки воспламеняемости титановых сплавов. В авиационной отрасли применяется большой комплекс методов для оценки пожаробезопасности материалов, в том числе магниевых сплавов [22]. Однако метод оценки пожарной безопасности титана в них отсутствует. В работе [23] выполнен анализ пожароопасных зон и приведены применяемые методы испытаний. В статье [24] представлена методика оценки огнестойкости огнезащитных перегородок из титана. Однако эти методы не позволяют оценивать воспламеняемость образцов из титановых сплавов.

Для оценки воспламеняемости титана и его сплавов отечественные и зарубежные исследователи применяли различные самостоятельно разработанные методики.

Так, в работе [5] для оценки пожаробезопасности титановых сплавов разработано несколько различных вариантов методик испытаний. Например, оценена способность сплавов воспламеняться при воздействии трения при различных температурах окружающей среды (рис. 1). Однако эти испытания отличаются от условий работы материалов в двигателях по атмосферному давлению воздуха или кислорода, форме образцов, условиям трения, поэтому можно получить не совсем корректные результаты.

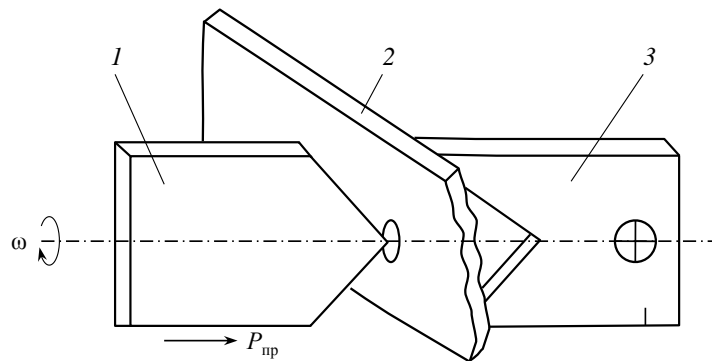


Рис. 1. Схема испытательного оборудования для оценки воспламеняемости титановых сплавов под воздействием нагрева за счет трения [5]: 1 – клин; 2 – пластина; 3 – упор ( $\omega$  – скорость вращения;  $P_{пр}$  – усилие прижатия)

В работах [9, 15] использована специально сконструированная установка в виде трубы (рис. 2), в которую подается сжатый и нагретый до нужной температуры воздух, а образец испытываемой титановой лопатки поджигается при помощи различных устройств, в том числе капель расплава, а также электрической дугой или лазерным излучением. Отмечено, что при горении титана создается высокая температура ( $>3300$  °С, т. е. выше, чем при электродуговой сварке) и высокоинтенсивный ультрафиолетовый поток (более чем в 5 раз интенсивнее, чем при горении магния). Высокие температуры и интенсивное УФ-излучение способны вывести из строя экспериментальное оборудование – вызвать прогар корпуса испытательного стенда, возможен также выход из строя матрицы видеорегистрирующей аппаратуры.

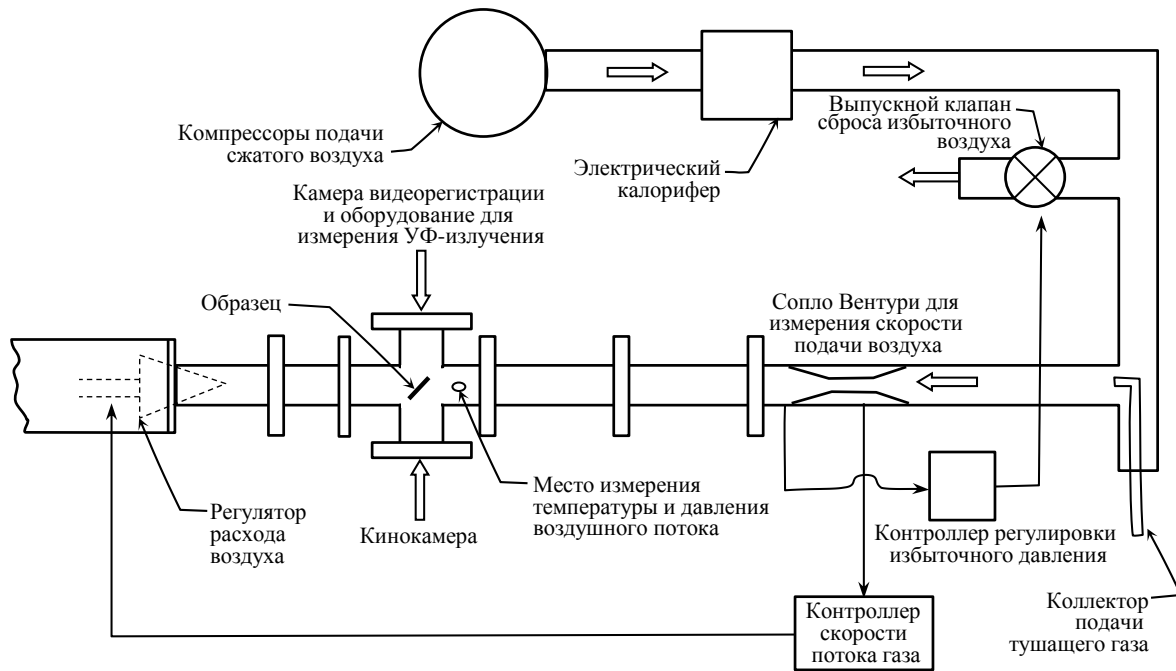


Рис. 2. Схема испытательного оборудования, имитирующего условия работы титановой лопатки в компрессоре авиационного двигателя [9]

В работе, выполненной в Национальном бюро стандартов США (NBS, в настоящее время – NIST), использован комплекс различных методик: по оценке окислительной способности, воспламеняемости, статическому и динамическому горению образцов из титановых сплавов при различных температурах, давлении, скорости воздушного потока и угле атаки [25]. На рис. 3 приведена схема испытательной установки для оценки воспламеняемости образцов титановых сплавов под действием лазерного излучения.

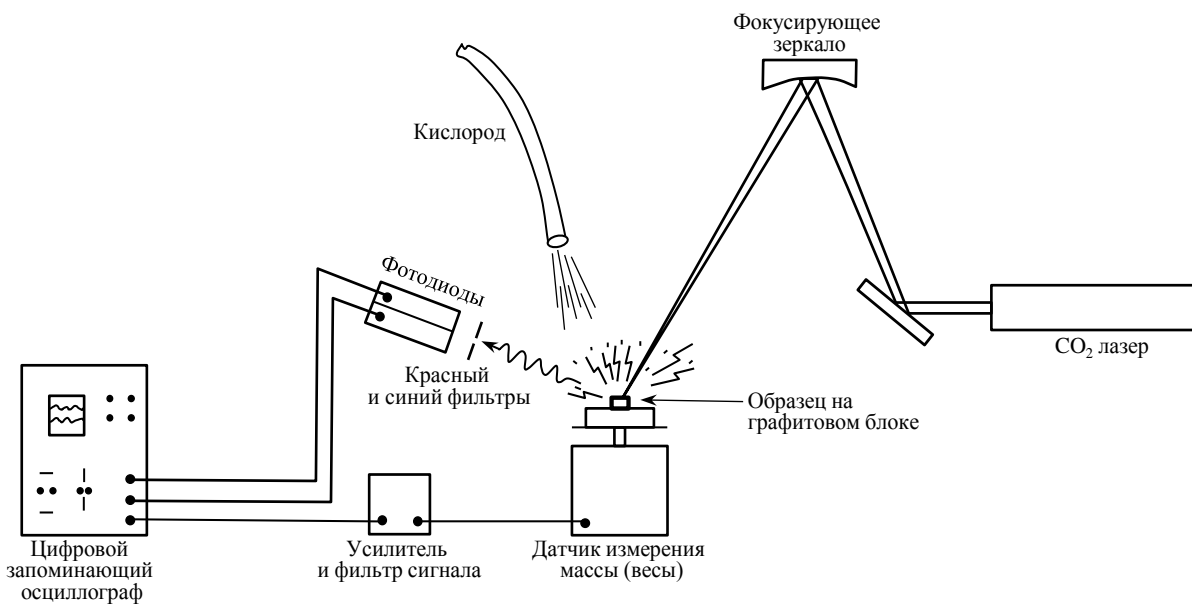


Рис. 3. Схема испытательного оборудования для исследования влияния химического состава титанового сплава на воспламеняемость при воздействии лазерного излучения [25]

Имеется ряд отечественных публикаций по исследованию горения порошков и пластин из титановых сплавов, например в работах [26–29]. Большой литературный научно-технический обзор отечественных и зарубежных исследований приведен в статье [30].

К сожалению, в большинстве случаев полученные результаты носят сравнительный характер и существенно меняются в зависимости от использованной методики испытания.

Установлено, что на условия воспламенения образцов титана влияет ряд факторов: химический состав сплава, температура плавления, размер и форма образцов, давление и содержание кислорода в атмосфере, условия обдува. В целом процесс воспламенения титана соответствует классической теории теплового взрыва – горение реализуется тогда, когда интенсивность выделения тепла превышает скорость теплоотвода. Но кроме тепловых условий воспламенения большое значение оказывают толщина и состояние оксидной или иной поверхностной (защитной) пленки.

В связи с этим эффективным способом предотвращения воспламенения титановых сплавов является наличие силикатного или иного защитного покрытия [31, 32].

Вторым по эффективности способом предотвращения воспламенения или обеспечения самостоятельного затухания элементов, выполненных из титановых сплавов, является использование такой формы образцов, чтобы обеспечивался интенсивный теплоотвод и минимальный контакт с раскаленным телом [9, 15].

Третий способ повышения пожаробезопасности изделий из титановых сплавов – изменение химического состава титанового сплава, т. е. увеличение содержания алюминия, циркония, меди и др. легирующих элементов [25].

### Заключения

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- пожары вследствие воспламенения титана в серийных двигателях крайне редко приводят к потере гражданской авиационной техники;

- проблемы воспламенения титановых деталей в компрессоре авиационного двигателя и неконтролируемого горения титана, приводящего к выходу из строя двигателя, обусловлены в первую очередь ошибками при конструировании двигателя, которые должны устраняться на этапах разработки и доводки конструкции. Дополнительно рекомендуется применять защитные покрытия, обеспечивающие наличие оксидной пленки на поверхности, предотвращающей диффузию металла к поверхности;

- непосредственно титан и титановые сплавы стойки к воздействию огня до температуры плавления (1650 °С) вследствие наличия на поверхности плотной пленки из рутила (диоксида титана). Поэтому титан и его сплавы широко применяются в качестве огнепреграждающих перегородок, работающих до температуры 1500 °С и предотвращающих распространение огня, например, от углеводородного пожара. Воспламенение титана и его сплавов происходит при значительном перегреве (близком или выше температуры плавления) и быстром удалении оксидной пленки – образовании ювенильной поверхности;

- отсутствует узаконенная нормативная база по проведению испытаний титановых сплавов на воспламеняемость;

- в случае принятия решения о необходимости создания отечественной испытательной базы для проведения огневых испытаний образцов из титановых сплавов, необходимо проведение проектных конструкторских работ по созданию стенда, на котором должны имитироваться реальные условия работы образцов. Для образцов из титановых сплавов, предназначенных для изготовления лопаток компрессора авиационного

двигателя, – это следующие условия: повышенные давление воздуха и скорость воздушного потока заданной температуры; возможность установки образцов под различными углами атаки и различной формы; специальная система видеорегистрации, устойчивая к УФ-излучению; система пожаротушения и предотвращения поджига близкорасположенных объектов.

#### Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2007. № 5. С. 7–27.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. № 1. С. 3–8.
4. Перельман В.И. Краткий справочник химика. М.: Гос. н.-т. изд-во хим. лит., 1951. 676 с.
5. *Авиационные материалы и технологии* / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2007. Вып.: Горение и пожаробезопасность титановых сплавов / Е.А. Борисова, Н.М. Складов. 80 с.
6. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Изотова А.Ю., Новак А.В. Пожаробезопасные титановые сплавы и особенности их применения // *Титан*. 2012. № 4 (38). С. 42–46.
7. Бай А.С., Лайнер Д.И., Слесарева Е.Н., Цыпин М.И. Окисление титана и его сплавов. М.: *Металлургия*, 1970. 320 с.
8. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: *Наука*, 1972. 294 с.
9. Fox D.G. Investigation of Titanium Combustion Characteristics and Suppression Techniques: Report AFAPL-TR-75-73 Air Force Aero-Propulsion Laboratory. 1976. 66 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0350.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
10. Sarkos C.P. Titanium Fuselage Environmental Conditions in Post-Crash Fires: Technical Report FAA-RD-71-3 (FAA-NA-71-2). FAA, US. 1971. 74 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-3.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
11. Sarkos C.P. Small-scale fire tests of high-temperature cabin pressure sealant and insulating materials: Report FAA-RD-71-67. Federal Aviation Administration. National Aviation Facilities Experimental Center, 1971. 35 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-67.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
12. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. CS-25. Amendment 28. 1515 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> (дата обращения: 02.12.2024).
13. Титановый пожар: Росавиация назвала причины отказа двигателя Ту-204 в полете // *Вести.ru*. URL: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=3052737> (дата обращения: 02.12.2024).
14. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Анализ основных направлений исследований, выполняемых зарубежными организациями, занимающимися пожарной безопасностью авиационной техники и материалов авиационно-космического назначения (обзор) // *Проблемы безопасности полетов*. 2018. № 2. С. 3–35.
15. Uihlein T., Schlegel H. Titanium Fire In Jet Engines. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0457.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
16. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-186-194.
17. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // *Труды ВИАМ*. 2015. № 10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.12.2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.

18. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2013-0193-2021-0-1-61-70.
19. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Опыт ВИАМ в области разработки и исследования экономнолегированных титановых сплавов нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2016. № 9 (45). Ст. 05 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 2.12.2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
20. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Заводов А.В. Предпосылки разработки нового малолегированного технологичного титанового сплава средней прочности с рабочей температурой до 400–450 °С, способного к упрочнению // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-33-50.
21. Путырский С.В., Плохих А.И., Арисланов А.А., Наприенко С.А., Анисимова А.Ю. Исследование структуры и механических свойств материала со слоистой структурой на основе композиции из титановых сплавов BT1-0 и BT4 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
22. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 424 с.
23. Барботько С.Л., Кириенко О.А., Вольный О.С., Луценко А.Н. Анализ пожарной опасности мотогондол авиационных двигателей и других пожароопасных зон; используемые методы огневых испытаний материалов и конструктивных элементов на соответствие требованиям авиационных норм // *Проблемы безопасности полетов*. 2017. № 5. С. 3–24.
24. Барботько С.Л., Вольный О.С., Вешкин Е.А., Гончаров В.А. Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // *Авиационная промышленность*. 2018. № 2. С. 63–67.
25. Stobridge Th.R., Moulder J.C., Clark A.F. Titanium Combustion in turbine Engines: Report FAA-RD-79-51. NBSIR 79-1616, NBS. 1979. 137 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir79-1616.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
26. Черненко Е.В., Грива В.А., Розенбанд В.И. Исследование закономерностей воспламеняемости титановых порошков // *Физика горения и взрыва*. 1982. Т. 18. № 5. С. 20–26.
27. Бахман Н.Н., Кузнецов Г.П., Пучков В.М. Горение пластин титана // *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36. № 4. С. 60–65.
28. Bolobov V.I. Mechanism of Self-Ignition of Titanium Alloys in Oxygen // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2002. Vol. 38. No. 6. P. 639–645.
29. Белоусова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В. Исследование горения частиц титана // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 1. С. 276–278.
30. Глотов О.Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // *Успехи физических наук*. 2019. Т. 189. № 2. С. 135–171. DOI: 10.3367/UFNг.2018.04.038349.
31. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
32. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Григоренко В.Б., Козлов И.А. Изменения свойств поверхности титанового сплава BT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 2.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5.

## References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials for Aerospace Engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
3. Kablov E.N. Quality Control of Materials – a Guarantee of Safe Operation of Aviation Equipment. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
4. Perelman V.I. *Brief Handbook of a Chemist*. Moscow: State Sci. Publ. House of Chemical Literature, 1951. 676 p.
5. *Aviation Materials and Technologies*. Ed. by E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2007, is.: Combustion and Fire Safety of Titanium Alloys, 80 p.
6. Nochovnaya N.A., Alekseev E.B., Izotova A.Yu., Novak A.V. Fire-safe titanium alloys and features of their application. *Titan*, 2012, no. 4 (38), pp. 42–46.
7. Bai A.S., Lainer D.I., Slesareva E.N., Tsyplin M.I. *Oxidation of titanium and its alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 320 p.
8. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S., Korotkov A.I. *Combustion of powdered metals in active environments*. Moscow: Nauka, 1972, 294 p.
9. Fox D.G. *Investigation of Titanium Combustion Characteristics and Suppression Techniques*: Report AFAPL-TR-75-73 Air Force Aero-Propulsion Laboratory, 1976, 66 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0350.pdf> (accessed: December 02, 2024).
10. Sarkos C.P. *Titanium Fuselage Environmental Conditions in Post-Crash Fires*: Technical Report FAA-RD-71-3 (FAA-NA-71-2). FAA, US, 1971, 74 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-3.pdf> (accessed: December 02, 2024).
11. Sarkos C.P. *Small-scale fire tests of high-temperature cabin pressure sealant and insulating materials*: Report FAA-RD-71-67. Federal Aviation Administration. National Aviation Facilities Experimental Center, 1971. 35 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-67.pdf> (accessed: December 02, 2024).
12. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes*. CS-25. Amendment 28. 1515 p. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> (accessed: December 02, 2024).
13. *Titanium fire: Rosaviatsia named the reasons for the Tu-204 engine failure in flight*. Available at: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=3052737> (accessed: December 02, 2024).
14. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyyenko O.A., Shurkova E.N. Analysis of the main areas of research carried out by foreign organizations involved in fire safety of aviation equipment and aerospace materials (review). *Problemy bezopasnosti poletov*, 2018, no. 2, pp. 3–35.
15. Uihlein T., Schlegel H. *Titanium Fire In Jet Engines*. Available at: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0457.pdf> (accessed: December 02, 2024).
16. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-186-194.
17. Arislanov A.A., Goncharova L.J., Nochovnaya N.A., Goncharov V.A. Prospects for the use of titanium alloys in laminated composite materials. *Trudy VIAM*, 2015, no. 10, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 02, 2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
18. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2013-0193-2021-0-1-61-70.

19. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S., Bokov K.A. VIAM experience in the field of development and research of economically alloyed titanium alloys of new generation. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
20. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Zavodov A.V. Prerequisites for the development of new low-alloyed technological medium strength titanium alloy with operating temperature up to 400–450 °C, capable of strengthening. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-33-50.
21. Putyrskiy S.V., Plokhikh A.I., Arislanov A.A., Naprienko S.A., Anisimova A.Yu. Study of structure and mechanical properties of the laminar structure material based on titanium alloys VT1-0 and VT47. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
22. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyyenko O.A., Shurkova E.N. *Fire safety assessment of polymeric materials for aviation purposes: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 424 p.
23. Barbotko S.L., Kiriyyenko O.A., Volny O.S., Lutsenko A.N. Fire hazard analysis of aircraft engine nacelles and other fire hazardous areas; fire testing methods used for materials and structural elements for compliance with aviation standards. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2017, no. 5, pp. 3–24.
24. Barbotko S.L., Volny O.S., Veshkin E.A., Goncharov V.A. Assessment of fire resistance of materials and structural elements for aviation equipment. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2018, no. 2, pp. 63–67.
25. Stobridge Th.R., Moulder J.C., Clark A.F. *Titanium Combustion in turbine Engines*: Report FAA-RD-79-51. NBSIR 79-1616, NBS, 1979, 137 p. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir79-1616.pdf> (accessed: December 02, 2024).
26. Chernenko E.V., Griva V.A., Rozenband V.I. Study of the flammability patterns of titanium powders. *Fizika goreniya i vzryva*, 1982, vol. 18, no. 5, pp. 20–26.
27. Bakhman N.N., Kuznetsov G.P., Puchkov V.M. Combustion of titanium plates. *Fizika goreniya i vzryva*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 60–65.
28. Bolobov V.I. Mechanism of Self-Ignition of Titanium Alloys in Oxygen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 639–645.
29. Belousova N.S., Glotov O.G., Guskov A.V. Study of titanium particle combustion. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2017, vol. 1, pp. 276–278.
30. Glotov O.G. Ignition and combustion of titanium particles. Experimental research methods and results. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2019, vol. 189, no. 2, pp. 135–171. DOI: 10.3367/UFNr.2018.04.038349.
31. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a  $\alpha+\beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– $\beta$ -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
32. Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu., Grigorenko V.B., Kozlov I.A. Changes in the surface properties of titanium alloy VT20 in the chemical removal of operational carbon pollution. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5.

**Информация об авторах**

**Барботько Сергей Львович**, начальник сектора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Sergey L. Barbotko**, Head of the Sector, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.02.2025.  
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 05.02.2025.