

УДК 621.45.002.3: 681.3.016

## **Банк данных ЦИАМ по конструкционной прочности материалов**

**Васильев Б.Е.\***, **Магеррамова Л.А.\*\***, **Колотников М.Е.\*\*\***,

**Голубовский Е.Р.\*\*\*\***, **Волков М.Е.\*\*\*\*\***

*Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова,  
ул. Авиамоторная, 2, Москва, 111116, Россия*

*\*e-mail: [b\\_vasilyev@ciam.ru](mailto:b_vasilyev@ciam.ru)*

*\*\*e-mail: [mag@ciam.ru](mailto:mag@ciam.ru)*

*\*\*\*e-mail: [kolotnikov@ciam.ru](mailto:kolotnikov@ciam.ru)*

*\*\*\*\*e-mail: [golubovskiy@ciam.ru](mailto:golubovskiy@ciam.ru)*

*\*\*\*\*\*e-mail: [mvolkov@ciam.ru](mailto:mvolkov@ciam.ru)*

### **Аннотация**

Приведены результаты многолетней работы по созданию отраслевого банка данных (БД) ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» по конструкционной (реализуемой в конструкции в ожидаемых условиях эксплуатации) прочности применяемых для изготовления основных и ответственных деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) металлических сплавов, предназначенного для накопления, хранения сведений по их характеристикам. БД содержит характеристики большого количества материалов (более 120 наименований), необходимые для расчётов статической прочности и циклической долговечности, динамических характеристик и ресурса деталей ГТД в широком диапазоне условий их нагружения и эксплуатации. БД разработан на базе программного комплекса «Granta MI platform» и состоит из нескольких разделов, содержащих справочную информацию, результаты испытаний,

результаты статистической обработки и расчетные характеристики. Описаны структура БД, функциональные возможности, особенности взаимодействия пользователей. Разработана структура раздела БД по металлическим образцам из заготовок, изготовленным с помощью аддитивными технологиями.

**Ключевые слова:** Банк данных, металлические материалы, конструкционная прочность, ресурс, авиационные газотурбинные двигатели.

## **Введение**

Создание и доводка современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) сопряжены с многочисленными расчетами напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и динамики узлов и деталей двигателя, а также с обоснованием ресурса основных деталей и проведением сертификации, анализом причин выявляемых в процессе эксплуатации и испытаний дефектов и разработкой мероприятий по предотвращению появления дефектов. Для этого необходим полный набор данных по конструкционной (реализуемой в конструкции) прочности материалов.

При сертификации авиационных двигателей необходимо располагать результатами специальной квалификации материалов [1-6]. Специальной квалификации подлежат материалы/полуфабрикаты, применяемые для изготовления основных и ответственных деталей двигателя. В результате специальной квалификации для каждого материала/полуфабриката, из которого изготавливаются детали двигателя, формируется статистически обоснованный комплекс

механических характеристик, для чего требуется проведение большого числа экспериментов. Так, для применяемого для изготовления диска турбины сплава одной марки необходимо испытать более 1500 образцов.

Специальная квалификация и экспериментальное определение характеристик материалов/полуфабрикатов проводятся в испытательных лабораториях. На рисунке 1 показан ряд испытательных машин, входящих в состав аккредитованной для сертификационных испытаний лабораторий ЦИАМ.



Рисунок 1 – Один из участков испытательной лаборатории ЦИАМ

Обеспечить идентичность характеристик материалов, используемых инженерами при проведении расчётов прочности и динамики деталей двигателей трудно. Зачастую инженеры формируют расчётные данные из различных потенциально ненадежных источников. Даже при совместном использовании одних и тех же данных возможно их неверное толкование.

Современные методы установления и увеличения ресурса двигателей предусматривают возможность применения расчетно-экспериментального метода подтверждения ресурса основных деталей двигателя при значительном сокращении

объема трудоемких и дорогостоящих циклических испытаний двигателя и/или его основных (критических по последствиям отказа) деталей [3,5].

Создание отраслевого банка данных (БД) по конструкционной прочности сплавов является актуальной задачей для обеспечения перехода к современной стратегии подтверждения ресурса посредством повышения достоверности расчетов прочности и динамики и установления ресурса основных деталей расчетно-экспериментальным методом.

Широкое применение имеют справочные и автоматизированные базы данных по характеристикам материалов (например, [7-10]).

Зарубежные авиадвигателестроительные фирмы имеют собственные БД по конструкционной прочности материалов, сформированные на основе собственного опыта испытаний и эксплуатации деталей. Эти БД являются интеллектуальной собственностью фирм.

Можно упомянуть также автоматизированный банк данных MP-DC, в котором собраны сведения о свойствах 5000 металлов и сплавов, программу «Атлас сталей мира», содержащую базу данных (общее число марок сталей 54000), немецкую программу «Ключ сталей», которая содержит сведения о стандартных характеристиках механических свойств 45000 марок сталей и др.

В России в настоящее время имеются необходимость и возможность создания отраслевого БД по конструкционной прочности применяемых в ГТД материалов, что обусловлено интеграцией предприятий промышленности (наличием корпорации АО «ОДК»), сохранением центральных отраслевых институтов (ФГУП «ЦИАМ», ФГУП «ВИАМ»), использованием при формировании БД преимущественно

бюджетного финансирования, ограниченным количеством поставщиков полуфабрикатов/материалов и возможностями испытательных лабораторий. Наличие отраслевого БД позволит не только повысить достоверность расчетов прочности и обоснованность экспертизы поломок деталей ГТД, но также обеспечить переход на современную стратегию подтверждения ресурса.

### **Назначение банка данных по конструкционной прочности материалов**

Важнейшее значение для обеспечения прочностной надежности двигателей имеет тщательное исследование особенностей деформирования и разрушения в ожидаемых условиях эксплуатации конструкционных материалов, надежное определение статистически обоснованных значений (минимальных) характеристик конструкционной прочности, которые должны использоваться при подтверждении надежности и ресурса и надежно контролироваться в процессе производства двигателей [2, 3].

Отраслевой БД по конструкционной прочности предназначен для накопления информации о материалах для деталей авиационных двигателей. Он должен соответствовать требованиям конструкторов, специалистов по конструкционной прочности материалов, инженеров, специализирующихся в области расчетов прочности. Использование БД позволит обеспечить:

- проведение расчётов прочности и динамики деталей двигателя в соответствии с требованиями нормативных технических документов;
- совместимость и идентичность информации, полученной различными предприятиями отрасли и заводами-производителями сплавов;

- корректность и оперативность уточнения используемых в расчетах сведений по свойствам материалов по мере накопления экспериментальных данных;
- автоматизацию сбора, хранения, обработки и последующей передачи информации в программные комплексы;
- конфиденциальность, повышения сохранности, защиты и целостности данных;
- независимость данных от использующих их расчетных программ;
- единство процедур ведения баз данных и создания интерфейсных модулей поиска элементов в базах данных;
- переход на современную стратегию подтверждения ресурса основных деталей;
- снижение затрат времени и средств предприятиями авиадвигателестроительной отрасли.

### **Концепция банка данных**

БД – это система специальным образом организованных данных, программных, языковых, организационно-методических средств, предназначенных для обеспечения централизованного накопления и коллективного многоцелевого использования этих данных [11-13].

Основу БД составляют базы данных, содержащие сведения о сплавах, используемых для изготовления деталей авиационных двигателей, в том числе некоторые данные о химическом составе, способе производства, технологичности,

способах термообработки, видах полуфабрикатов, условиях эксплуатации, а также значения физико-механических свойств и характеристики конструкционной прочности (кратковременной и длительной статической прочности, малоцикловой и многоцикловой усталости и т.д.). Эти данные необходимы для проведения различных расчетов на прочность и долговечность конструкций.

Для создания, ведения и совместного использования БД пользователями необходим комплекс программных и языковых средств, которым является система управления базами данных (СУБД).

Корректность и оперативность получения используемых в расчетах деталей двигателей данных по свойствам материалов должна быть обеспечена автоматизацией сбора, хранения, обработки и последующей передачи информации в программные комплексы.

Кроме того, накопленную в БД информацию пользователь должен иметь возможность обрабатывать, просматривать посредством произвольных запросов в интерактивном режиме независимо от расчетных задач.

Применение БД даст возможность пользователям:

- использовать существующую, помещать новую и редактировать уже внесенную информацию о материалах;
- оперативно извлекать информацию о выбранном сплаве по его марке;
- сравнивать свойства выбранных сплавов;
- отыскивать сплавы по базовым параметрам;
- представлять информацию в виде таблиц и графиков;

- выводить таблицы и графики на принтер, а также файлы, содержащие характеристики материалов, в формате, необходимом для импорта в расчётные программные комплексы.

### **Компоненты банка данных и разделов баз данных**

Банк данных состоит из [13]:

- баз данных в которых в структурированном виде хранится необходимая информация;
- СУБД – комплекса программных и языковых средств;
- вычислительных средств и программного обеспечения для работы пользователей с базами данных;
- системы словарей, в которых описаны виды хранимой информации;
- административных средств, предназначенных для ведения БД, разделения доступа различным пользователям.

Для обеспечения сохранности информации в БД необходимо разделить доступ к функциям банка данных пользователей различных групп (рисунок 2). Основное деление пользователей основано на принципе доступа к функциям просмотра данных и их редактирования. При развитии БД возможно менять права доступа. Подобное разделение используется в БД ЦИАМ.

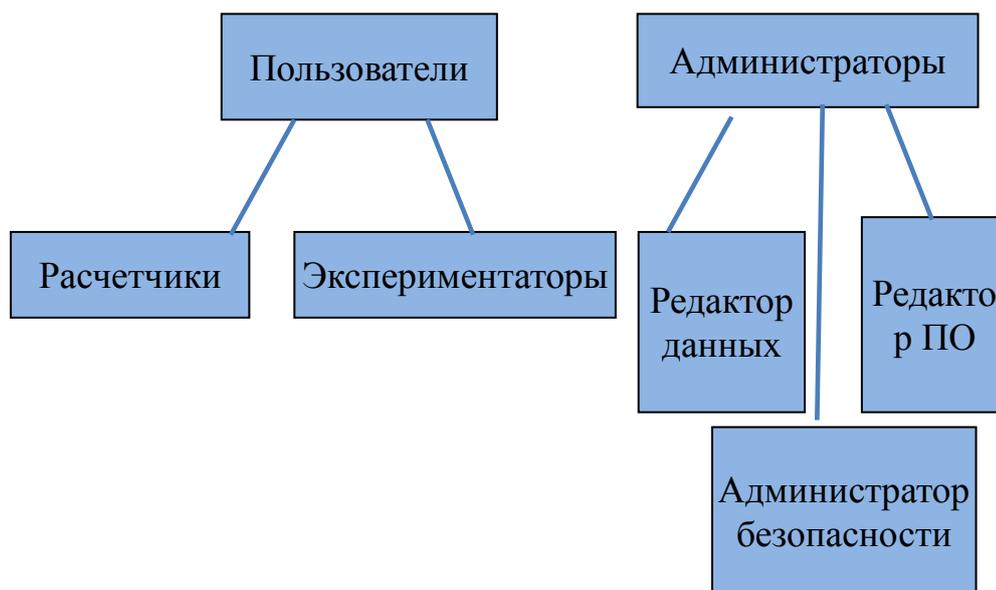


Рисунок 2 – Разделение функций доступа БД

Для пользователей – расчетчиков характерны следующие функции:

- оперативное извлечение информации о выбранном сплаве по его марке;
- поиск сплава по задаваемым параметрам;
- сравнение характеристик выбранных сплавов;
- представление информации в виде таблиц и графиков;
- вывод таблиц и графиков в файлы.

Пользователи– экспериментаторы кроме функций пользователей – расчетчиков, должны использовать следующие функции:

- ввод первичных экспериментальных данных;
- осуществление статистической обработки экспериментальных данных в соответствии с требованиями нормирующих документов [3, 4];
- передача обработанных данных, полученных при специальной квалификации материалов, в БД.

Группа администраторов БД включает редакторов данных, редакторов

программного обеспечения и администраторов безопасности.

Редакторы данных, помимо функций пользователей, могут осуществлять введение новой информации, удаление и редактирование справочных данных и результатов экспериментов.

Редакторам программного обеспечения доступны функции редактора данных, а также сопровождение (частичная реструктуризация, изменения в предметной области, программирование диалогов и др. программ).

Администратор безопасности осуществляет разделение доступа различным группам и связь пользователей с сервером.

Реализация банка данных ЦИАМ по конструкционной прочности материалов и его структура

БД ЦИАМ основан на базе программного решения Granta Mi [14], в котором используется реляционная система построения БД [15]. Данный программный продукт является стандартным отраслевым решением с интуитивно-понятным интерфейсом и регулированием доступа для различных пользователей.

Основные разделы БД включают исходные (экспериментальные и справочные данные), промежуточные данные, которые являются результатами конкретных выборок и обработок экспериментальных данных и расчетные данные. На рисунке 3 показаны основные разделы БД.

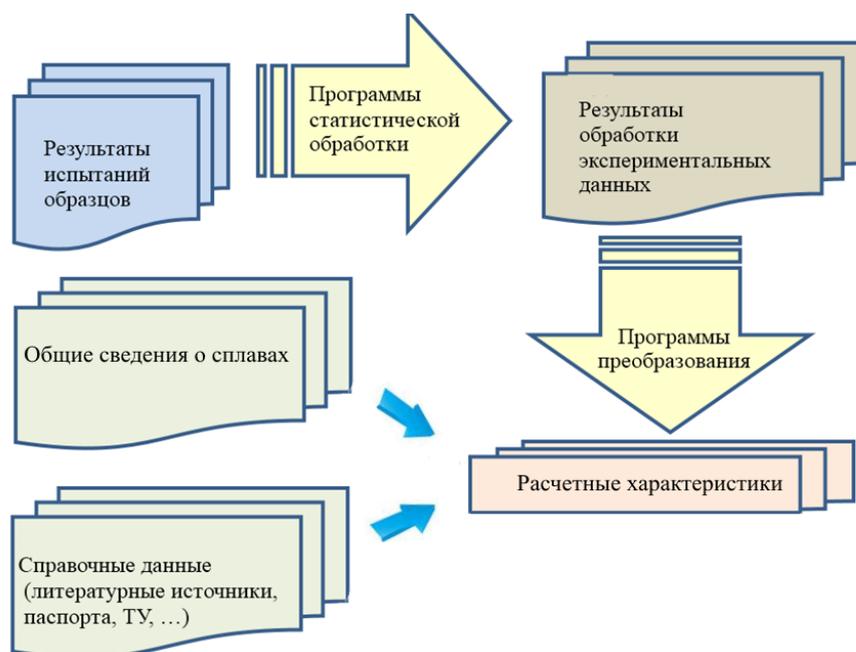


Рисунок 3 – Основные разделы БД ЦИАМ

БД ЦИАМ состоит из нескольких больших разделов.

- Раздел «Общие сведения о сплавах» включает основные данные о сплавах, к которым относятся химический состав, методы получения, технологические характеристики, виды изготавливаемых полуфабрикатов, рекомендуемые виды термической обработки, изделий, условия их эксплуатации и т.д.
- Раздел «Справочные данные» содержит характеристики более чем 10000 металлических материалов по данным различных документов (паспортов, справочников, ТУ, ОСТ, ГОСТ и т.д.).
- Раздел «Результаты испытаний» содержит сведения о проведенных испытаниях конкретных металлических образцов. К этим данным относятся сведения об образцах, их характеристиках, истории их изготовления, о виде, параметрах и условиях испытаний, об

испытательном оборудовании, организациях – поставщиках сплава и полуфабриката, образца испытаний, и организациях, выполнивших испытания, результаты испытаний образцов и т.д.

- Раздел «Статистическая обработка» содержит результаты статистической обработки экспериментальных данных. В этот раздел включены сведения об используемом методе статистической обработки, выборке, параметрах обработки, а также значения средних, минимальных значений характеристик и среднеквадратических отклонений.
- Раздел «Расчетные характеристики» содержит характеристики сплава, необходимые для расчетов на прочность, полученные в результате статистической обработки экспериментальных данных. Данные значений могут быть экспортированы в различные программные комплексы для проведения численных исследований [16].

Дополнительно разрабатывается раздел «Аддитивные технологии» с результатами испытаний образцов из заготовок, изготовленных аддитивными технологиями.

Для взаимодействия пользователей с БД разработан диалоговый интерфейс – программы (рисунок 4).

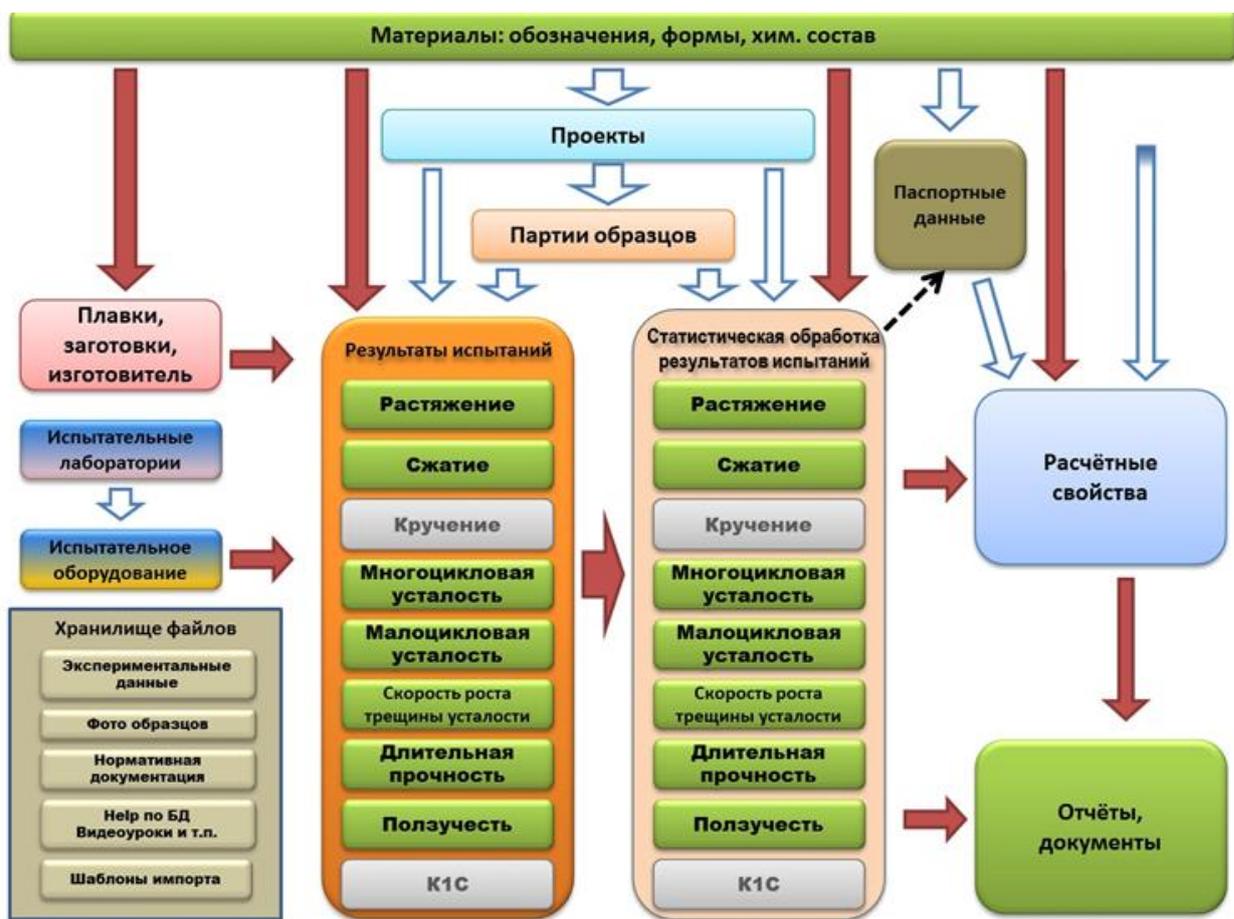


Рисунок 4 – Схема диалогового окна

На рисунке 4 показаны элементы схемы диалогового окна БД ЦИАМ, содержащие:

- «Материалы» – перечень материалов, исследуемых при проектировании двигателей и в рамках научных работ, с указанием справочных характеристик, полученных из открытых источников.
- «Проекты» – шифры проектов научных работ, № договоров, в рамках которых проведены испытания и получены характеристики исследуемых материалов.
- «Партии образцов» – информация о заготовке, месте выреза и чертежах образцов.
- «Паспортные данные» – характеристики материала, указанные в

паспорте на материал и сертификате заготовке.

- «Плавки, заготовки, изготовитель» – перечень производителей испытуемой продукции с указанием шифров и плавков испытанных заготовок материалов.
- «Испытательные лаборатории» – перечень лабораторий, которые проводят испытания для получения характеристик исследуемых материалов.
- «Испытательное оборудование» – наименование и краткие технические характеристики установок для проведения испытаний.
- «Хранилище файлов» – файлы испытаний, изображений изломов образцов, нормативной документации.
- «Результаты испытаний» – результаты испытаний образцов (с описанием условий испытаний, указанием оборудования, оператора и т.д.) после первичной обработки данных.
- «Статистическая обработка результатов испытаний» – характеристики материалов, полученные путем обработки результатов испытаний в соответствии с определенными статистическими критериями, по типам испытаний.
- «Расчетные свойства» – выходные данные, полученные в результате статистической обработки, используемые для экспорта в комплексы программ для расчета прочности и динамики деталей авиационных двигателей, а также установления ресурса основным деталям

авиационных двигателей.

- «Отчеты и документы» – отчетные материалы, выпускаемые по результатам проведенных испытаний (технические отчеты, справки и прочее).

Большое значение имеет также наличие сведений о результатах испытаний и опыте эксплуатаций деталей с сопоставлением экспериментальных данных и результатов расчетов, проведенных с использованием содержащихся в БД характеристик материала.

### **Раздел БД «Аддитивные технологии»**

В настоящее время данные о свойствах металлических материалов, полученных методами аддитивных технологий (АТ), практически отсутствуют. Трудность заключается в необходимости учета для изготовления того или иного объекта множества параметров.

Эти параметры могут обеспечиваться требованиями к технологическому оборудованию; требованиями к исходным материалам и полуфабрикатам; технологическим процессом.

Для каждого объекта должен быть подобран порошковый сплав (или проволочная заготовка) с необходимыми характеристиками, оборудование для изготовления детали из этого порошка и разработан технологический процесс. Кроме того, необходимо определить процессы последующей обработки выращенного объекта.

Механические свойства деталей, изготавливаемых АТ из металлических

порошковых сплавов, определяются совокупностью всех этих составляющих. При этом каждая составляющая определяется своими параметрами.

Наиболее часто в АТ применяются порошки. Порошковый материал характеризуется химическим и гранулометрическим составом, включениями, овальностью, текучестью и т.д.

Эти характеристики порошкового сплава или порошковой композиции в свою очередь зависят от исходного сырья, процесса получения из него порошка и оборудования. При этом химический состав и структура конечного продукта могут отличаться от имеющихся у исходного материала.

Оборудование, используемое для построения объекта, в свою очередь определяется:

- характеристиками источника энергии (типом источника, способом фокусировки/механизмом передачи энергии, мощностью источника, распределением энергии в спекающем пучке);
- механизмом подачи сырья (скоростью подачи, температурой нагрева);
- атмосферой в рабочей камере (наличием определённой газовой среды, концентрацией газа, давлением газа);
- перемещением печатающей головки (скоростью перемещения, разрешением печати, повторяемостью заданного профиля) и т.д.

Все эти параметры связаны между собой. Настройка параметров оборудования под каждый объект и материал является сложной задачей.

В частности, при использовании лазерных технологий прочностные свойства материала определяются следующими факторами:

- параметрами лазера (мощность, размер пятна, длительность импульса, частота, и т.д.);
- параметрами сканирования (скорость, шаг и последовательность);
- характеристиками порошка (форма частиц, размер и распределение размеров по фракциям, насыпная плотность, толщина слоя, свойства материала и т.д.);
- уровнем температуры (слоя, подаваемого порошка, стола), а также равномерностью распределения температуры и т.д.).

Проблемы, возникающие при изготовлении изделий методами АТ, в основном следующие: пористость, анизотропия свойств, возникновение остаточных напряжений, низкие значения механических характеристик, неудовлетворительное качество поверхности (высокая шероховатость), излишки неспекшегося материала. Поэтому для достижения необходимого уровня механических характеристик могут понадобиться различные виды постобработки: механическая, горячее изостатическое прессование (ГИП), термическая обработка, поверхностная упрочняющая обработка.

На характеристики деталей, изготавливаемых как аддитивными, так и традиционными технологиями, оказывает влияние упрочняющие поверхностные обработки, защитные покрытия и т.д. Особенно большое значение имеют применяемые методы неразрушающего контроля.

На рисунке 5 приведена укрупненная структура раздела банка данных, относящаяся к испытаниям образцов, получаемых методами аддитивных технологий.

Стрелки от организации относятся к каждому поставщику: сырья, порошка, образца, постобработок, испытания.

Часть, относящаяся к результатам испытаний образцов из этого раздела «Аддитивные технологии», имеет структуру, аналогичную соответствующей части структуры раздела «Результаты испытаний».



Рисунок 5 – Структура раздела банка данных по испытаниям образцов, получаемых методами АТ

В разделах банка данных, относящихся к традиционным и аддитивным способам изготовления, а также постобработки следует ввести информацию о контроле этих операций.

## Выводы

В результате проведенных работ по созданию отраслевого банка данных по конструкционной прочности материалов:

- разработана структура банка данных;
- создана удобная процедура импорта (после проведения экспериментов) и экспорта характеристик материалов (для проведения расчётов прочности и динамики);
- осуществлено наполнение банка данных по конструкционной прочности материалов, проведена работа по импорту данных об испытаниях более чем 10000 образцов;
- разработаны и внедрены в банк данных подходы статистической обработки с возможностью оперативного выбора набора данных и метода обработки;
- осуществлено наполнение раздела, содержащего расчётные данные;
- разработана структура раздела «Аддитивные технологии».

Разрабатываемый банк данных ЦИАМ по конструкционной прочности материалов по закладываемым при его создании подходам соответствует мировым аналогам и может быть использован предприятиями авиадвигателестроительной отрасли для расчетов прочности и динамики, установления ресурса основных и ответственных деталей двигателей, а также экспертизы дефектов.

### ***Благодарность***

*Авторы благодарят сотрудников ФГУП «ЦИАМ» Ножницкого Ю.А., Вильтер Н.П., Стародубцева В.В., Бредихину Е.Н., Эммаусского Н.М., а также специалистов АО «ОДК», АО «ОДК-Авиадвигатель» и ФГУП «ВИАМ» за участие в работе по созданию банка данных.*

## Библиографический список

1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. Межгосударственный авиационный комитет. – М: Авиаиздат, 2012. - 46 с.
2. Руководство 33-ВД-М. Порядок оценки соответствия материалов, используемых в конструкции авиационного двигателя, требованиям авиационных правил. - М.: Авиаиздат, 2013. – 14 с.
3. Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-33.15-1. Методические рекомендации по определению расчётных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. - М.: Авиаиздат, 2013. – 43 с.
4. Ножницкий Ю.А, Качанов Е.Б., Голубовский Е.Р., Куевда В.К. Требования к порядку и процедурам оценки расчётных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов основных и особо ответственных деталей при сертификации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение авиационных газотурбинных двигателей. 2015. Т. 14. № 3-1. С. 37 - 48.
5. Полатида Л.Б. На пути к 3-й стратегии управления ресурсом. URL: <http://www.pmz.ru/pr/other/aviadv/IB-16/IB-16>
6. Полатида Л.Б. Банк данных для ПД 14 // Двигатель. 2013. №. 4. С. 10-11.
7. Military handbook. AMSCMIL-HDBK-5H: metallic materials and elements for aerospace vehicle structures, USA, Department of Defense, 1998, 1653 p.
8. Авиационный справочник. Расчетные значения характеристик авиационных

металлических конструкционных материалов. АС1.1.М.001-2012. Выпуск 4. ОАК. – М: ЦАГИ, 2012. - 118 с.

9. Трощенко В.Т., Лепихин П.П, Хамаза Л.А., Бабич Ю.Н. Автоматизированный банк данных «Прочность материалов» // Проблемы прочности. 2009. № 3. С. 5 - 13.

10. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2014. - 1216 с.

11. Магеррамова Л.А., Слезкин Д.В., Скольцов В.И. Применение баз данных по свойствам конструкционных материалов MSC.MVISION для проектирования, расчетов на прочность и ресурс деталей авиационных двигателей и других установок // II Международная научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века». Сборник трудов. Москва, 2005, ЦИАМ им. П.И. Баранова, Ч. 2. С. 124-126.

12. Дейт К. Введение в системы баз данных. – М.: Наука, 1980. – 662 с.

13. Диго С.М. Проектирование баз данных. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 216 с.

14. GRANTA MI for the enterprise. URL: <https://www.grantadesign.com/products/mi/system.htm>

15. Мейер Д. Теория реляционных баз данных. – М.: Мир, 1987. – 608 с.

16. Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Афшари П. Хорошко А.Л. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. №. 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69638>