

УДК 621.438-226.002.3:539.4:681.3.016

ПРОБЛЕМЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАНКА ДАННЫХ ПО КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЦИАМ И ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАНКА ДАННЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДИСКА ТУРБИНЫ

Б. Е. Васильев¹, Ю. А. Ножницкий², А. В. Сальников³,
Н. М. Эммаусский⁴, М. Е. Волков⁵

¹b_vasilyev@ciam.ru, ²nozhnitsky@ciam.ru, ³salnikov@ciam.ru, ⁴actjoy@mail.ru, ⁵mvolkov@ciam.ru

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (ЦИАМ)

Поступила в редакцию 24.05.2018

Аннотация. Рассмотрены некоторые проблемы, связанные с формированием расчетных характеристик конструкционной прочности металлических сплавов. Описаны подходы к статистической обработке характеристик кратковременной прочности и указаны особенности построения условных кривых деформирования. Приведен пример работы с банком данных по конструкционной прочности ЦИАМ при проведении проектировочных и поверочных расчетов напряженно-деформированного состояния и прочности диска турбины высокого давления. Показано влияние характеристик материала диска турбины высокого давления на его конструктивный облик и характеристики прочности.

Ключевые слова: банк данных; металлические материалы; конструкционная прочность; прочностная надежность; кривые деформирования; выборка; генеральная совокупность; детали газотурбинных двигателей; проектирование; оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Создание и доводка современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) сопряжены с многочисленными расчетами напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и динамики узлов и деталей двигателя. Для этого необходим набор данных по конструкционной (реализуемой в конструкции) прочности материалов [1].

Среди расчетных исследований прочности и динамики деталей и сборочных единиц (ДСЕ) можно выделить несколько направлений, для выполнения которых нужны определенные значения свойств материала. Ниже описаны некоторые из них.

1. Расчет НДС и местных запасов прочности ДСЕ на рабочих режимах. В данном случае уровень пластических деформаций, как правило, не превышает 1–2%. Считается, при таких значениях деформаций выбор

между истинными и условными кривыми деформирования не оказывает значительно влияния на результат [2, 3].

2. Моделирование разгонных испытаний дисков турбомашин методом последовательных расчетов. В данном случае величина пластических деформаций может достигать предельных значений для материала. Для проведения таких расчетов необходимо использовать истинные кривые деформирования. Критерием разрушения детали является достижение исследуемым параметром (например, энергией деформирования или суммарной деформацией [4]) в некоторой области конструкции предельной величины.

3. Расчеты быстропротекающих процессов. В этом случае характеристики материалов необходимо задавать в виде их зависимости от скорости деформирования. Наиболее часто используются модели Джонсона–

Кука, Купера–Саймондса [5, 6]. Как правило, критерием разрушения является достижение предельной величины определенного параметра, например, эквивалентной деформации.

4. Расчеты собственных частот и форм колебаний, а также вынужденных колебаний деталей и узлов, расчеты критических частот вращения роторов [7], для проведения которых необходимо использовать значения динамического модуля упругости [3].

5. Расчет устойчивости в линейной и нелинейной постановках. В этом случае достаточно сведений об условных кривых деформирования.

В данной работе рассмотрено первое из перечисленных направлений.

Несмотря на большое число литературных источников, посвященных обработке экспериментальных данных, в настоящее время отсутствуют подробные руководства по обработке экспериментально определенных значений характеристик кратковременной прочности. Требования в различных документах частично противоречивы.

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА СТАТИСТИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЭИ698-ВД

Анализ нормативной документации и опыта проведения испытаний. Рассеяние характеристик механических свойств материалов является объективным свойством конструкционных материалов и деталей машин [8], которое должно учитываться при создании деталей газотурбинных двигателей. Согласно [9, 10] характеристики материалов должны определяться на основании достаточного количества испытаний образцов, позволяющих установить статистически обоснованные значения их свойств, необходимые для проведения расчетов прочности и динамики (расчетные значения (P3)) характеристик.

В качестве P3 предела упругости материала (модуля Юнга) используются средние значения, для остальных характеристик кратковременной прочности (предел пропорциональности ($\sigma_{\text{плц}}$), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B), относительное сужение (ψ), относительное удлинение (δ))

должны использоваться минимальные значения, которые определяются по формуле [11]:

$$X_{P3} = \bar{X} - UP \times \text{СКО},$$

где \bar{X} – среднее значение характеристики; UP – значение квантиля распределения Гаусса (нормального распределения) для заданной вероятности неразрушения с заданной доверительной вероятностью; СКО – среднее квадратическое отклонение.

При расчете основных (критических по последствиям разрушения) деталей принимается $UP=3$, для деталей, не отнесенных к категории основных, принимается $UP=2$. Если используются иные значения UP , то они должны быть согласованы с сертифицирующими органами.

Зачастую при определении некоторых характеристик материала наблюдается существенная нестабильность значений. Например, для сплава ЭИ698-ВД согласно данным, полученным на большом числе образцов (более 20 при каждой температуре), статистически обоснованные минимальные значения δ вследствие высокого разброса при определенной температуре принимают отрицательные значения (рис. 1). На рис. 1 для сравнения приведены также зависимости для средних, минимальных значений и СКО деформации (ϵ_b), соответствующей пределу прочности, от температуры. Значение СКО ϵ_b , в особенности при повышенных температурах, ниже СКО δ .

В таких случаях необходимо тщательно анализировать причины появления подобных результатов.

Испытания образцов на кратковременную прочность проводятся в соответствии с требованиями отечественных [12, 13] или зарубежных [14, 15] стандартов.

Типоразмеры образцов приведены в указанных стандартах. Если испытания проводятся по стандартам ASTM E-8 и ASTM E-21, то построение диаграммы растяжения каждого образца и определение значения статического модуля упругости E осуществляется по показаниям силоизмерителя и экстензометра, установленного на рабочей части образца.

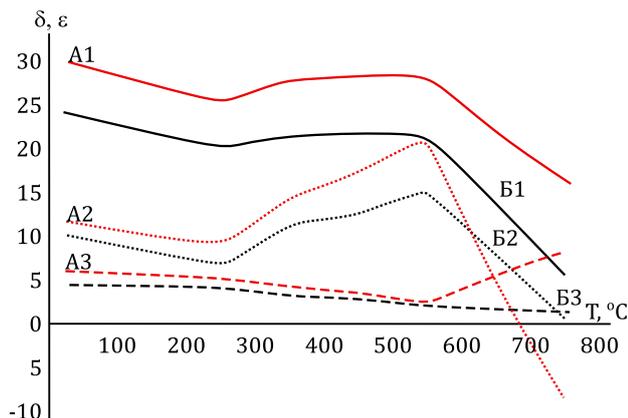


Рис. 1. Зависимость параметров пластичности от температуры для сплава ЭИ698-ВД:
 А1, В1 – средние значения δ и ϵ_b ;
 А2, В2 – минимальные значения δ и ϵ_b ;
 А3, В3 – СКО δ и ϵ_b

Задача определения модуля упругости не всегда является тривиальной, результаты существенно зависят от используемых подходов к определению модуля упругости [16].

Например, для сплава ЭИ698-ВД средние значения модуля упругости при 20°C, определенные в трех лабораториях, лежат в диапазоне 175–228 ГПа, а СКО меняется от 4 до 22 ГПа. Данные результаты свидетельствуют о необходимости дополнительных работ по формированию единых подходов к проведению испытаний и обработке полученных результатов, а также об обязательном проведении регулярных перекрестных испытаний между лабораториями, участвующими в формировании банка данных (БД).

На рис. 2, а схематично показаны условные и истинные кривые деформирования, на рис. 2, б показано два варианта условных кривых деформирования – по минимальным и средним характеристикам.

Зачастую отсутствуют данные по ϵ_b (рис. 2, а), так как испытания проводились либо без экстензометра, либо экстензометр (во избежание его разрушения) отводится от образца после достижения заданной деформации (рабочая характеристика датчика), что может быть раньше, чем разрушается образец или начинает образовываться шейка. В разных предприятиях при проведении таких испытаний экстензометр отводится при различных деформациях.

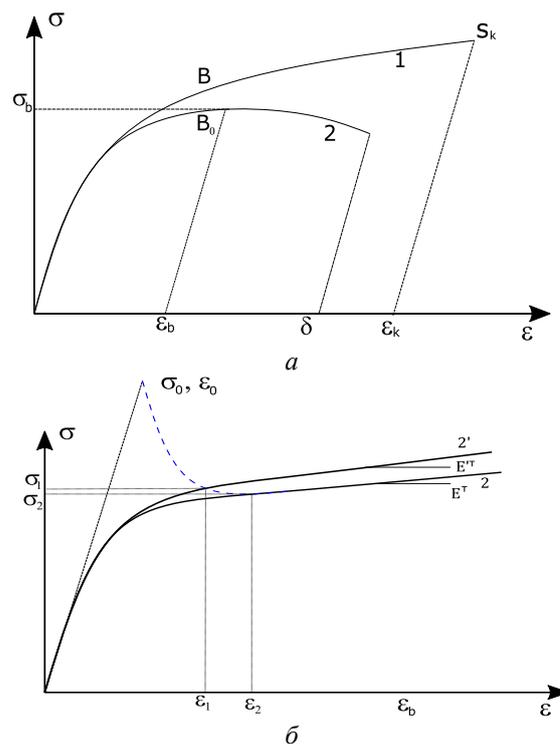


Рис. 2. Схематичное отображение кривых деформирования:
 а – истинные (1) и условные (2);
 б – 2' минимальные и 2 – средние, $E^T > E^T$

Отсутствуют четкие рекомендации по построению статистически обоснованных кривых деформирования, в т.ч. определенных в процессе циклического нагружения. Влияние рассеяния характеристик материала при построении кривой деформирования при оценке статической прочности и циклической долговечности может быть противоположным. Для модуля упругости необходимо задавать средние значения, так как использование минимальных значений приведет к занижению прогнозируемых значений термических напряжений. Что касается значений параметров пластичности (ϵ_b , δ) и предела прочности σ_b , характеризующих значение модуля упрочнения, то этот вопрос требует тщательной проработки. Так, на рис. 2, б показано, что при учете более высокого модуля упрочнения прогнозируются (в качестве примера используется гипербола Нейбера) более высокие напряжения при заниженных значениях деформаций, что, вопреки идеологии нормативных технических документов, будет не консервативно при оценке циклической долговеч-

ности, но консервативно при расчете статической прочности. Данный вывод относится и к различию между истинными и условными кривыми деформирования (рис. 2, а).

Отсутствуют четкие рекомендации по определению характеристик упругости и пластичности, в связи с чем данные об этих характеристиках имеют высокий разброс.

Данные по динамическому модулю упругости зачастую отсутствуют в документах на материал.

Отсутствуют в требуемом количестве испытательное оборудование и рекомендации в нормативных технических документах по методикам проведения испытаний в условиях высокоскоростного нагружения (для формирования зависимостей характеристик от скорости нагружения) и в условиях действия агрессивной среды.

Для монокристаллических сплавов отсутствуют данные по значениям характеристик прочности в различных кристаллографических направлениях.

Дополнительно следует отметить класс задач обеспечения ранжирования запасов прочности элементов узла, т.е. обеспечения очередности разрушения деталей. Например, для предотвращения раскрутки рабочего колеса турбины иногда используется метод проектирования, при котором лопатки при раскрутке ротора должны разрушаться раньше диска. В таком случае для лопаток логично задавать максимальные характеристики конструкционной прочности материала. Однако в нормативных документах отсутствуют указания о величинах СКО характеристик прочности, которые необходимо учитывать при формировании набора расчетных свойств материала лопатки.

При использовании минимальных значений ($UP=3$) кратковременной и длительной статической прочности, характеристик малоцикловой и многоцикловой усталости необходимо скорректировать систему запасов прочности, приведенных в нормативных технических документах.

Статистическая обработка экспериментальных данных о характеристиках конструкционной прочности и формирование кривых деформирования. При статистической обработке экспериментальных

данных механических испытаний образцов из металлических материалов (полуфабрикатов) на кратковременную прочность часто принимается справедливой гипотеза о нормальном законе их распределения (распределение Гаусса). В исключительных случаях после проведения испытаний образцов проводится проверка гипотезы о принадлежности выборки нормальному закону распределения с использованием одного из критериев (Пирсона–Колмогорова, Колмогорова–Смирнова, Шапиро–Уилка и др). Критерий Ирвина или Граббса используются для оценки возможных грубых ошибок [8, 11].

Рекомендации по проведению испытаний образцов и по процедурам обработки экспериментальных данных с целью получения статически обоснованных расчетных значений характеристик конструкционной прочности приведены в [11–15]. Однако эти описания не являются достаточно подробными и в некоторых случаях возможна различная их трактовка, что может привести к тому, что построенные различными специалистами кривые деформирования по одним и тем же экспериментальным данным будут существенно отличаться. Подробнее вопрос о построении кривых деформирования рассмотрен в [17].

На рис. 3 приведено несколько вариантов построения кривой деформирования: В1 – с помощью модификации средней кривой деформирования исходя из значений СКО, В2 и В3 – построение по характерным точкам: средние значения E и минимальные значения $\sigma_{пл}$, σ_{02} , σ_B , ϵ_B / δ соответственно, В4 – с помощью формулы Рамберга–Осгуда [18], В5 – кривая В2 переведена в истинную.

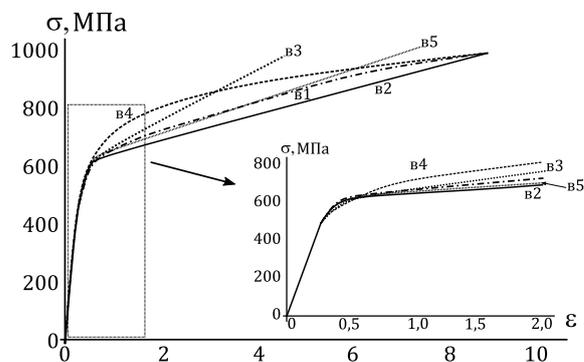


Рис. 3. Пример построения кривой деформирования ЭИ698-ВД при 650°C

Различие между кривыми деформирования сплава ЭИ698-ВД при повышении температуры свидетельствует о необходимости тщательного обоснования использования значения δ при построении кривых деформирования ввиду ее большого разброса и зависимости от длины рабочей части.

ОПИСАНИЕ БАНКА ДАННЫХ ЦИАМ ПО КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

БД ЦИАМ [1] по конструкционной прочности предназначен для накопления и использования информации о материалах для ДСЕ газотурбинных двигателей и основан на базе программного решения Granta MI, в котором используется реляционная система построения БД. Данный программный продукт является стандартным отраслевым решением с интуитивно-понятным интерфейсом и регулированием уровня доступа для различных групп пользователей.

Основные разделы БД ЦИАМ включают экспериментальные значения, промежуточные данные, которые являются результатами статической обработки экспериментальных данных и расчетные характеристики. На рис. 4 показаны основные разделы БД.

Раздел БД ЦИАМ «Расчетные характеристики» содержит набор статистически обоснованных характеристик большого числа сплавов (на момент написания статьи – это 14 наиболее используемых сплавов, и их число повышается), необходимых для проведения расчетов на прочность.



Рис. 4. Основные разделы БД ЦИАМ

Данные могут быть экспортированы в различные программные комплексы для проведения численных исследований (в т.ч. написан модуль для экспорта данных в ANSYS Mechanical APDL). Имеются воз-

можности выбора между минимальными (с выбором UP) и средними характеристиками при экспорте, отслеживания изменений характеристик, а также возврата к предыдущим версиям расчетных значений характеристик.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИСКА ТВД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАНКА ДАННЫХ

Постановка задачи. Для демонстрации работы с БД ЦИАМ [1] по конструкционной прочности материалов выбран жаропрочный никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД (ЭИ698-ВД) [19]. Рекомендуемые области применения сплава – это диски турбин и другие высоконагруженные детали ГТД.

После экспериментального определения в лаборатории ЦИАМ характеристик на образцах из ЭИ698-ВД проведена их статистическая обработка и сформировано несколько наборов расчетных характеристик (НРХ) конструкционной прочности: НРХ 1 – статистически обоснованные средние и НРХ 2 – минимальные характеристики (-3σ). Характеристики длительной статической прочности и малоциклового усталости (МЦУ) сплава ЭИ698-ВД обработаны в соответствии с [11].

В целях сравнения с помощью справочных данных сформирован дополнительный набор расчетных значений (НРХ 3). В качестве примера в табл. 1 приведены значения при 20°C .

Таблица 1

Сравнение характеристик ЭИ698-ВД при 20°C

	Е, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ϵ_B , %
Средние значения (НРХ 1)	215	765	1209	30	24
СКО	3,8	13,2	36,5	6,25	4,6
РЗ (НРХ 2)	–	725	1100	18	10
Справочные данные (НРХ 3)	196	794	1206	18	–

Описание объекта исследований и метода оптимизации. **Постановка задачи оптимизации.** Габаритные размеры модельного диска приведены на рис. 5, а. Частота вращения диска составляет 30 000 об/мин. На ободную часть прикладывается контурная нагрузка от лопаток и выступов, равная 180 МПа.

Используемая схема параметризации конструкции диска приведена на рис. 5, б. Рамкой выделены варьируемые параметры. Неварируемые параметры (без рамки) определяются из конструктивных ограничений. Таким образом, в процессе оптимизации варьируется 12 параметров диска.

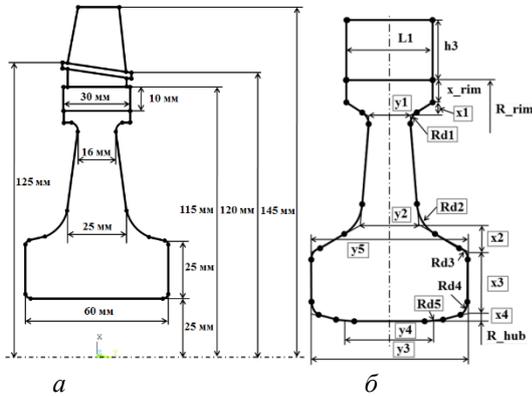


Рис. 5. Модельный диск:
а – габаритные размеры;
б – схема параметризации

Тепловое состояние диска определяется на каждой итерации оптимизации с помощью линейной интерполяции радиальной эпюры, исходя из характерных значений температур ступицы и обода (200°C и 570°C соответственно).

Поиск оптимальных проектов проводится при помощи метода многокритериальной оптимизации IOSO – технологии многомерной нелинейной оптимизации, использующей алгоритмы на основе самоорганизации и регрессионные модели [20]. Подробнее о подходе к проведению оптимизации указано в [21].

Для демонстрации работы с БД решено две задачи:

- оптимизация модельного диска турбины с использованием различных наборов характеристик; ограничение по минималь-

ному значению долговечности при $\text{МЦУ} > 20\,000$ циклов;

- расчет циклической долговечности модельного диска турбины с использованием различных наборов характеристик.

Первая задача решена для нескольких постановок:

П1. Использование НРХ 1, вычисление циклической долговечности осуществляется по формуле Мэнсона [3].

П2. Использование НРХ 2, вычисление циклической долговечности осуществляется по формуле Мэнсона.

П3. Использование НРХ 3, вычисление циклической долговечности по формуле Мэнсона.

П4. Использование НРХ 1, вычисление циклической долговечности с использованием средних кривых МЦУ.

П5. Использование НРХ 2, вычисление циклической долговечности с использованием минимальных кривых МЦУ(-3 σ).

В модифицированной формуле Мэнсона в качестве предельных величин учитывались значения длительной статической прочности. При использовании кривых МЦУ асимметрия цикла не учитывалась.

Во всех случаях в качестве критерия оптимизации выбрано условие минимизации массы конструкции. В качестве дополнительных ограничений используется требование к минимальным значениям запасов по разрушающей частоте вращения [3]: $K_{B1} > 1,4$ и $K_{B2} > 1,4$. Оценка циклической долговечности осуществлена без учета возможных дефектов и коэффициентов запаса для цикла 0 – МАКС – 0.

Результаты и обсуждение. В табл. 2 приведены результаты оптимизации, где для

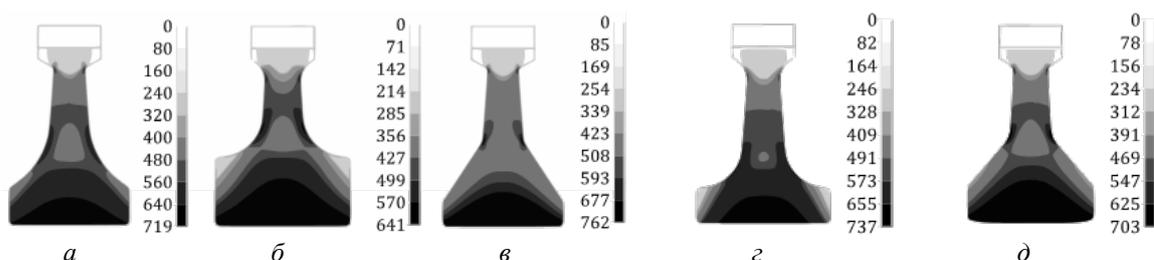


Рис. 6. Вид диска, сформированного в результате оптимизации и распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (МПа): а, б, в, г, д – постановки №1–№5

каждой из постановок указана масса диска, изменение массы по сравнению с массой диска, спроектированного по справочным данным (Δ), какое из ограничений достигло минимального значения, максимальные значения эквивалентных по Мизесу напряжений ($\sigma_{эқв}$), суммарных (ϵ_{Σ}) и пластических ($\epsilon_{пл}$) деформаций. Зона максимальных значений напряжений соответствует центральной точке ступичной части диска (рис. б).

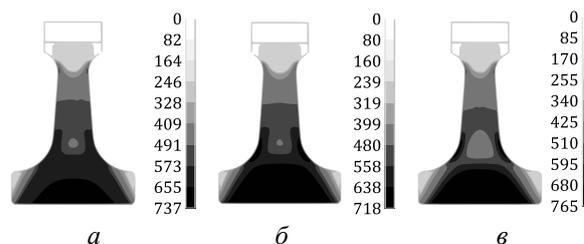


Рис. 7. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (МПа) в оптимизированном диске (постановка № 4) с разными НРХ: а, б, в – НРХ № 1–№ 3

Таблица 2

Результаты оптимизации

	м, кг	Δ , %	Огран.	$\sigma_{эқв}$, МПа	ϵ_{Σ} , %	$\epsilon_{пл}$, %
П1	6,63	1	МЦУ, $K_{В1}$	720	0,79	0,44
П2	9,25	41	МЦУ	641	0,74	0,42
П3	6,54	–	МЦУ, $K_{В1}$	762	0,73	0,32
П4	6,48	–1	$K_{В1}$	738	0,97	0,61
П5	7,20	10	МЦУ	703	0,73	0,38

Очевидно, что конструктивный облик и, соответственно, масса диска существенно зависят от характеристик материала. Так, при использовании минимальных характеристик масса увеличивается по сравнению с данными справочника на 10 и 41% в зависимости от способа прогнозирования циклической долговечности.

В табл. 3 приведены результаты поверочных расчетов (задача № 2) для диска, спроектированного с использованием средних характеристик и кривых МЦУ (постановка 4). На рис. 7 показано распределение напряжений при использовании различных наборов характеристик.

Таблица 3

Результаты расчета НДС и прочности оптимизированного диска с разными НРХ

НРХ	МЦУ	$K_{В1}$	$\sigma_{эқв}$, МПа	ϵ_{Σ} , %	$\epsilon_{пл}$, %
Кривые МЦУ					
№ 1	21 140	1,40	738	0,97	0,61
№ 2	12 190	1,39	718	0,97	0,62
Формула Мэнсона					
№ 1	15 200	1,40	738	0,97	0,61
№ 2	9170	1,39	718	0,97	0,62
№ 3	16 000	1,40	766	0,87	0,46

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости проведения работ по формированию обоснованной системы запасов, в т.ч. циклической долговечности, при использовании БД. Для исследуемого диска при заданных нагрузках и допущениях падение расчетных значений циклической долговечности при использовании минимальных характеристик по сравнению с использованием средних достигает 42%.

Для демонстрации актуальности унификации способов построения минимальных кривых деформирования в табл. 4 приведены результаты расчета НДС и циклической долговечности при использовании кривых деформирования, построенных различными способами.

Таблица 4

Результаты расчета

	МЦУ Мэнсон	Δ , %	$\sigma_{эқв}$, МПа	ϵ_{Σ} , %	$\epsilon_{пл}$, %
В1	9170	–	718	0,97	0,62
В2	8520	–7	708	0,99	0,65
В3	8320	–9	704	0,99	0,65
В4	6850	–25	779	0,98	0,61
В5	9050	–1	716	0,98	0,64

Следует отметить, что при повышении температур диска и, соответственно, увеличении расхождения между результатами построения кривых деформирования (рис. 3), а также при повышении действующих на него нагрузок (увеличения пластических деформаций) различие в величинах прогнозируемой циклической долговечности может возрасти.

Анализ результатов сравнительных расчетов свидетельствуют не только о необходимости корректировки значений мини-

мальных запасов циклической долговечности, но и статической прочности с учетом отсутствия единого и подробного отраслевого способа построения минимальных кривых деформирования. Так, при использовании кривой деформирования вида 4 прогнозируется снижение расчетной величины циклической долговечности на 25%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В результате проведенных исследований нормативных документов как по обработке экспериментальных значений характеристик конструкционной прочности, так и по проведению расчетов НДС и прочности ДСЕ ГТД показана актуальность проведения дополнительных работ по унификации методов статистической обработки экспериментальных характеристик конструкционной прочности материалов.

На примере сплава ЭИ698-ВД показана цепочка действий и связанных с ними неопределенностей по экспериментальному определению характеристик материала, их статистической обработке и проведению расчетов НДС и прочности диска турбины.

Приведенные в представленной работе результаты наглядно свидетельствуют о существенном влиянии способа формирования исходных данных о свойствах материала на расчетные значения максимальных напряжений и деформаций в проектируемых конструкциях (рассмотрен модельный диск), и, как следствие этого, на расчетные значения запасов прочности и долговечности проектируемых конструкций, а также на конструктивный облик, определенный в результате оптимизации. Такое положение указывает на необходимость унификации способа формирования характеристик материала, для проведения расчетов прочности и динамики, а также на необходимость прове-

дения работ по формированию обоснованной системы запасов, в т.ч. циклической долговечности, при использовании БД.

Эта задача может быть решена только на основе совместной работы ЦИАМ и предприятий отрасли.

Авторы благодарят д-ра техн. наук Колотникова М. Е. за замечания и пожелания по совершенствованию работы, а также Бредихину Е. Н. и Стародубцева В. В. за помощь при обработке данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б. Е., Магеррамова Л. А., Колотников М. Е., Голубовский Е. Р., Волков М. Е. Банк данных ЦИАМ по конструкционной прочности материалов // Труды МАИ. 2017. № 96. [В. Е. Vasilyev, L. A. Magerramova, M. A. Kolotnikov, E. R. Golubovskiy, M. E. Volkov, "CIAM data bank for structural strength of materials," (in Russian), in *Trudy MAI*, no. 96, 2017.]
2. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопrotивление материалов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с. [I. A. Birger, R. R. Mavlyutov, *Strength of materials*, (in Russian), Moscow, Nauka, 1986.]
3. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1993. 640 с. [I. A. Birger, B. F. Shorr, G. B. Iosilevich, *Calculation of the strength of machine parts: Handbook*, 4th ed. (in Russian), Moscow, Mashinostroenie, 1993.]
4. Каримбаев К. Д., Серветник А. Н. Численное моделирование разгонных испытаний дисков турбомашин // Вісник двигунобудування, 2008. № 3. С. 130–134. [K. E. Karimbaev, A. N. Servetnik, "Numerical simulation of acceleration tests of turbomachine disks" (in Russian), in *Visnik dvigunobuduvannya*, no. 3, pp. 130-134, 2008.]
5. Jutras M. Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook Model. *Citeseer*, 2008, 73 p.
6. Ren N., Ou J. Dynamic numerical simulation for ship-OWT collision // *Reliability, Maintainability and Safety*, 2009. ICRMS 2009. 8th International Conference on. IEEE, 2009, p. 1003–1007
7. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / под ред. Биргера И. А., Шорра Б. Ф. М.: Машиностроение, 1981. 232 с. [*Dynamics of aviation gas turbine engines*, ed. I. A. Birger, B. F. Shorr, (in Russian) Moscow, Mashinostroenie, p. 232, 1981.]
8. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1985. 232 с. [M. N. Stepnov, *Statistical methods for processing the results of mechanical tests*, (in Russian), Moscow, Mashinostroenie, 1985.]
9. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов // Межгосударственный авиационный комитет. Москва: ОАО «Авиаиздат», 2012. 46 с. [*Aviation rules. Part 33. Airworthiness of aircraft engines* (in Russian). Moscow: OAO "Aviaizdat", p. 46, 2012.]

10. **Ножницкий Ю. А., Качанов Е. Б., Голубовский Е. Р., Кувда В. К.** Требования к порядку и процедурам оценки расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов основных и особо ответственных деталей при сертификации авиационных газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2015. Т. 14, № 3–1. С. 37–48. [Y. A. Nozhnitskiy, E. B. Kachanov, E. R. Golubovskiy, M. E. Kuevda, "Requirements to the procedure and procedures for estimating design values of the structural strength characteristics of metallic materials of critical and critical parts for the certification of aviation gas turbine engines" (in Russian), in *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P.Koroleva*, vol. 14, no 3-1, pp. 37-48, 2015.]

11. **Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-33.15-1** // Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. 2013. [Reference circular № RC-AP-33.15-1. Methodical recommendations for determining design values of the structural strength characteristics of metallic materials (in Russian), 2013.]

12. **ГОСТ 1497-84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986. М.: Стандартинформ, 1986. 26 с. [Metals. Methods of tensile testing (in Russian), Federal standard GOST 1497-84, Moscow, Standatrinform, p. 26, 1986.]

13. **ГОСТ 9651-84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. - Введ. 01.01.1986. М.: Стандартинформ, 1986. 6 с. [Metals. Methods for tensile testing at elevated temperatures, (in Russian), Federal standard GOST 9651-84, Moscow, Standatrinform, p. 6, 1986.]

14. **ASTM E8 / E8M-13,** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials // Annual book of ASTM standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

15. **ASTM E21-17,** Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

16. **Lord J., Rides M., Loveday M. S.** "Tenstand": WP3 Final Report: Modulus Measurement Methods. Teddington, 2005. 49 p.

17. **Lord J., et al.** "Tenstand": WP1 Final Report: Digital Tensile Software Evaluation, NPL Report DEPC MPE 015 (2005). Teddington, 76 p., 2010.

18. **Ramberg W., Osgood W. R.** Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902. Washington DC, 1943. 29 p.

19. **ГОСТ Р 52802-2007.** Сплавы никелевые жаропрочные. Гранулируемые. Марки. Введ. 25.12.2007. М.: Стандартинформ, 2008. с. 12. [Nickel alloys are heat resistant. Granulated. Stamps, (in Russian), Federal standard GOST R 52802-2007, Moscow, Standatrinform, p. 12, 2007.]

20. **Егоров И. Н., Тюленев В. П., Павленко В. Ф.** Методы непрямої статистической оптимизации на основе самоорганизации и их использование в оптимизационных задачах авиационных ГТД // Деп. ВНИИ-ТИ. 1989. № 2622–В89. [I. N. Egorov, V. P. Tyulenev, V. F. Pavlenko, "Methods of indirect statistical optimization based on self-organization and their use in the optimization tasks of aviation GTE", (in Russian), in *Dep. VINI-TI*, vol. 2622-V89, 1989.]

21. **Сальников А. В., Васильев Б. Е.** Проектирование пустотелых дисков турбин и анализ эффективности их использования // Вестник УГАТУ. 2017. Вып. 21, № 3. с. 40–46. [A. V. Salnikov, B. E. Vasilyev, "Design of hollow discs of turbines and analysis of their efficiency", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 3, pp. 40-46, 2011.]

ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Борис Евгеньевич, дипл. инженер (МГТУ им. Баумана), канд. техн. наук., начальник отдела отделения прочности ЦИАМ. Иссл. в области развития методов проектирования и расчета прочности деталей ГТД, в том числе монокристаллических лопаток турбин.

НОЖНИЦКИЙ Юрий Александрович, доктор технических наук, заместитель генерального директора ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Обл. науч. инт-в: прочность и динамика двигателей и авиационных конструкций.

САЛЬНИКОВ Антон Владелинович, дипл. инженер-исследователь (МЭИ (ТУ), 2008), аспирант, ведущий инженер отделения прочности ЦИАМ. Готовит дисс. о проблемах конструктивно-прочностной оптимизации деталей рабочих колес ГТД.

ЭММАУССКИЙ Николай Михайлович, дипл. инженер (РГТУ МАТИ им. К. Э. Циолковского), вед. инженер-испытатель отделения прочности ЦИАМ.

ВОЛКОВ Михаил Евгеньевич, дипл. инженер (МГТУ им. Баумана), нач. испытательного комплекса отд. прочности ЦИАМ. Иссл. в области статической кратковременной и длительной прочности и пластичности, ползучести, усталости, трещиностойкости сплавов для деталей авиадвигателей.

METADATA

Title: CIAM materials database formation problems and the example of database use in designing high-pressure turbine disk.

Authors: B. E. Vasilyev¹, Y. A. Nozhnitskiy², A. V. Salnikov³, N. M. Emmausskiy⁴, M. E. Volkov⁵

Affiliation:

Central Institute of Aviation Motors, Russia.

Email: ¹b_vasilyev@ciam.ru, ²nozhnitskiy@ciam.ru, ³salnikov@ciam.ru, ⁴actjoy@mail.ru, ⁵mvolkov@ciam.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 2 (80), pp. 45-54, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Some problems associated with the formation of design characteristics of structural strength of metal alloys are considered. The approaches to the statistical processing of the characteristics of short-term strength are described and the features of the construction of the conditional deformation curves are indicated. An example is given of working with CIAM data bank of the structural strength when performing design and verification calculations of the stress-strain state and the strength of the high-pressure turbine disk. The influence of the characteristics of the high-pressure turbine disk material on its structural shape and strength characteristics is shown.

Key words: data bank; metal materials; structural strength; strength reliability; deformation curves; sample; general population; gas turbine engine parts; design; optimization.

About authors:

VASILYEV, Boris Evgenevich, PhD, Head of department, Developing of new methods of engine parts design and its calculation. Engineer (Bauman University, 2007)

NOZHITSKY, Yuri Aleksandrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy General Director of Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Area of Research: strength of engines and structural elements.

SALNIKOV, Anton Vladelinovich, Lead engineer Stress analyses, optimized solutions. Engineer-researcher (MPEI, 2008).

EMMAUSSKIY, Nikolay Mikhailovich, Leading engineer on tests, (MATI, 2010).

VOLKOV, Mikhail Evgenevich, Head of the test complex, (Bauman University, 2007). Research in the field of static short-term and long-term strength and plasticity, creep, fatigue, crack resistance of alloys for aircraft engine parts.