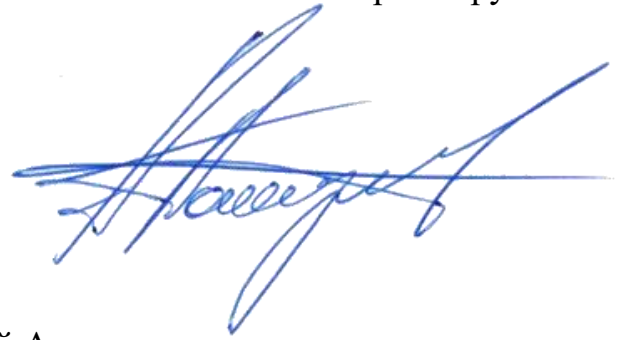


На правах рукописи



Позидаев Алексей Алексеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ

Специальность: 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Строкач Евгений Александрович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: Медников Алексей Феликсович
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", главный научный сотрудник научного центра «Повышение износостойкости энергетического оборудования электрических станций»

Попов Григорий Михайлович
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», доцент кафедры «Теория двигателей летательных аппаратов имени В.П. Лукачева»

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Защита состоится «19» октября 2026 года в 12 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=188603

Автореферат разослан: «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
доктор технических наук, доцент

Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Эксплуатация авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) осуществляется в широком диапазоне внешних условий, включая сухой климат, повышенную запыленность атмосферы, взлет и посадку с неподготовленных площадок и грунтовых взлетно-посадочных полос. В указанных условиях в проточную часть двигателя поступают твердые частицы пыли и песка, вызывающие эрозионное изнашивание деталей компрессора. Наиболее интенсивному воздействию подвергаются вертолетные ГТД, что связано с подъемом значительных объемов дисперсной фазы несущим винтом, а также двигатели самолетов, эксплуатируемых на неподготовленных аэродромах.

Эрозионный износ лопаток рабочих колес и направляющих аппаратов приводит к изменению геометрии входных и выходных кромок, уменьшению хорды и высоты пера, росту шероховатости, истончению профиля и увеличению радиального зазора. Эти изменения ухудшают аэродинамическое качество проточной части, снижают расход воздуха, степень повышения полного давления, коэффициент полезного действия и запас газодинамической устойчивости компрессора, а также приводят к уменьшению мощности двигателя, увеличению удельного расхода топлива и повышению вероятности аварийных режимов.

Моделирование процесса эрозионного износа позволяет вместо дорогостоящих испытаний двигателей предсказывать износ на этапе проектирования и апробировать способы защиты, в том числе формирование остаточных напряжений в поверхностный слой. Известные полуэмпирические модели эрозии, применяемые совместно с методами вычислительной газодинамики, позволяют получать карты воздействия частиц, однако область их корректного применения ограничена экспериментальной базой, типом материала и диапазоном параметров воздействия частиц. Прямое конечно-элементное моделирование в явной динамической постановке позволяет анализировать локальные механизмы деформирования и разрушения материала, но требует согласования с параметрами рабочего процесса и экспериментальной валидации.

В связи с этим актуальной является разработка методики прогнозирования эрозионного износа компрессорных лопаток ГТД, обеспечивающей согласованное использование результатов CFD-расчета двухфазного течения в тракте компрессора и конечно-элементного моделирования взаимодействия частиц с поверхностью деталей, что позволит увеличить точность и физическую корректность всей методики в целом.

Степень разработанности темы. Фундаментальные представления о механизмах эрозионного изнашивания твердыми частицами сформированы в работах J. Finnie и J. G. A. Bitter, в которых скорость и угол соударения были связаны с интенсивностью разрушения пластичных материалов. Дальнейшее

развитие моделей эрозии связано с работами W. Tabakoff, G. Grant, Y. I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida, И. Р. Клейса и других исследователей, учитывавших различие механизмов резания, деформационного и усталостного разрушения, а также свойства взаимодействующих материалов.

Эрозионное изнашивание проточной части ГТД, его влияние на рабочий процесс и способы защиты рассматривались в работах ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова» и НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также в исследованиях Л. С. Рысина, Р. Г. Перельмана, Ю. И. Шальмана, А. Н. Борковой, А. В. Гумерова, Р. Г. Акмалетдинова, В. А. Потапова, А. А. Санько, С. В. Meher-Homji, А. F. Bromley, J. P. Stalder, А. И. Евдокимова, Е. Н. Каблова, С. А. Мубояджяна, С. А. Будиновского, А. Ф. Медникова, J. Alqallaf, J. A. Teixeira, A. Addali и других авторов.

Несмотря на значительный объем исследований, недостаточно разработанным остается вопрос инженерного перехода от эксплуатационных и газодинамических параметров компрессора к расчетному прогнозу локального эрозионного износа материала лопаток с учетом модификации поверхностного слоя и остаточных напряжений.

Объект исследования: процесс эрозионного износа поверхностей лопаток компрессора.

Предмет исследования: влияние остаточных напряжений на эрозионную стойкость материала компрессорных лопаток.

Цель исследования: локальное повышение эрозионной стойкости компрессорных лопаток авиационного двигателя путем разработки методики прогнозирования, учитывающей влияние параметров рабочего процесса и поверхностных остаточных напряжений.

Задачи исследования:

1. Провести анализ условий возникновения, способов прогнозирования и методов моделирования эрозионного износа, а также способов повышения эрозионной стойкости компрессорных лопаток авиационного двигателя;

2. Определить средствами вычислительной газодинамики условия взаимодействия твердых частиц с поверхностью лопаток компрессора вдоль всего тракта всей проточной части;

3. На основе методов явной динамики построить модель процесса эрозионного износа твердыми частицами, провести анализ чувствительности модели к внутренним параметрам модели, граничным и начальным условиям, апробацию модели;

4. Экспериментально определить эрозионную стойкость образцов из сплава ВТ6 с параметрами потока, приближенными к условиям работы компрессора

авиационного двигателя, при наличии и отсутствии остаточных напряжений в поверхностном слое;

5. Предложить методику, валидированную по экспериментальным данным, и дать рекомендации по определению эрозионной стойкости поверхностей лопаток на ранних стадиях проектирования компрессоров ГТД и способы ее повышения.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработана методика прогнозирования эрозионного изнашивания поверхностей лопаток компрессоров ГТД при воздействии твердых частиц, позволяющая на ранних этапах проектирования компрессора определять зоны, наиболее подверженные эрозионному повреждению;

2. Методика прогнозирования эрозионного изнашивания валидирована на основе результатов экспериментальных исследований, воспроизводящих параметры рабочего процесса компрессора ГТД;

3. Определены расчетным методом условия воздействия твердых частиц на материал лопаток в зонах, подверженных эрозионному изнашиванию, включая распределения скоростей и углов соударения, температур процесса;

4. Установлено впервые экспериментальным методом для диапазона скоростей воздействия частиц 100-275 м/с и температур от 22 °С до 450 °С, что упрочнение сплава ВТ6 методом лазерной ударной обработки обеспечивает повышение сопротивления эрозионному износу на 17 %, 6,3 % и 10 % при углах воздействия 25°, 55° и 85° соответственно;

5. Получены впервые для диапазона скоростей 100-275 м/с и температур от 22 °С до 450 °С экспериментальные зависимости скорости эрозионного износа от угла воздействия для сплава ВТ6 без упрочнения и с упрочнением методом лазерной ударной обработки.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:

1. Экспериментально подтверждена возможность повышения эрозионной стойкости изделий, изготавливаемых из сплава ВТ6 путем создания сжимающих остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое лазерной ударной обработкой на 12%;

2. Экспериментально установлена величина скорости эрозионного износа в условиях параметров рабочего процесса в компрессорах авиационных ГТД для сплава ВТ6;

3. Подтверждена возможность использования математической модели для прогнозирования эрозионного износа по тракту и перу рабочих и направляющих лопаток компрессоров авиационных ГТД;

4. Подтверждена актом внедрения результатов диссертационной работы от ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО» при модернизации

существующих двигателей, а также проектировании и создании новых компрессоров ГТД.

Методология и методы исследования. В настоящей работе применены расчетные и экспериментальные методы исследований. При выполнении расчетных исследований применяются общеизвестные средства газодинамического анализа, реализованные в программном комплексе ANSYS CFX, и средства конечно-элементного анализа в явной динамической постановке, реализованные в программном комплексе LS-DYNA. Модель, полученная при проведении вычислительных исследований, валидирована по данным, полученным в ходе экспериментальных исследований, и может быть воспроизведена в любых программных комплексах. Экспериментальные работы выполняются на сертифицированном оборудовании с использованием проверенных и аттестованных средств измерений.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных математических моделей и программных комплексов, проведением исследования независимости результатов от сеточного разрешения, анализом чувствительности расчетной модели, применением аттестованных средств измерений, экспериментальным определением скорости частиц и массы уноса материала, сопоставлением расчетных и экспериментальных данных, а также согласованностью полученных зависимостей с известными представлениями о характере эрозии пластичных материалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика прогнозирования эрозионного износа лопаток компрессоров ГТД твердыми частицами;
2. Расчетная модель, прогнозирующая величину эрозионного износа деталей тракта компрессора ГТД, валидированная на экспериментальных данных для диапазона скоростей от 100 м/с до 250 м/с и температур от 22 °С до 450 °С с учетом остаточных напряжений в поверхностном слое;
3. Результаты испытаний по эрозионному износу твердыми частицами образцов из сплава ВТ6 в приближенных к компрессору ГТД условиях, упрочненных методом лазерной ударной обработки;
4. Экспериментальные и расчетные зависимости скорости эрозионного износа сплава ВТ6 в условиях, приближенных к рабочему процессу в компрессоре ГТД/ГТУ;
5. Результаты оценки чувствительности модели прогнозирования эрозионного износа к изменению настроечных параметров, их влияния на качественный и количественный вид расчетной кривой скорости эрозии твердыми частицами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: XLVI Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2020); 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». (Москва, 2020); I Международная молодёжная конференции «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование.» (Москва, 2020); 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». (Москва, 2022); 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». (Москва, 2023); XXI всероссийская научно-технической конференция с международным участием. «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2024); 24-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». (Москва, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним, опубликовано 4 работы.

Вклад автора в проведение исследований. Автором выполнены: постановка задач исследования, анализ современного состояния и развития работ по эрозионному износу, способов прогнозирования и защиты от эрозии, формулирование требований к экспериментальным исследованиям эрозионного износа с учётом остаточных напряжений, проведение расчетные исследования, анализ и обработка результатов экспериментальных и расчетных исследований, разработка и валидация модели эрозионного износа поверхностей деталей компрессора газотурбинных двигателей.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы используются в «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО» при модернизации существующих, а также при проектировании и создании новых компрессоров ГТД.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 169 наименований и 1 приложения. Общий объем диссертации составляет 176 страниц и включает 73 рисунка и 36 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, показана степень ее разработанности, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, приведены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, публикациях, личном вкладе автора и внедрении результатов.

В первой главе рассматриваются причины возникновения эрозионного износа компрессоров авиационных ГТД, его влияние на рабочий процесс и

основные способы защиты. Показано, что твердые частицы песка, пыли и вулканического пепла вызывают неравномерное изнашивание входных и выходных кромок, поверхностей корыта и спинки профиля, причем характер распределения износа изменяется по ступеням компрессора: на первых ступенях возможно уменьшение хорды по всей высоте пера, а на последующих ступенях износ концентрируется преимущественно в периферийной области.

Показано, что эрозионное повреждение лопаток приводит к росту потерь ступени, уменьшению угла поворота потока, снижению степени повышения давления, коэффициента полезного действия, расхода воздуха и запаса газодинамической устойчивости. В качестве основных направлений защиты выделены снижение концентрации частиц на входе в двигатель с использованием пылезащитных устройств и модификация поверхностного слоя деталей, включая нанесение эрозионностойких покрытий и создание упрочненного слоя.

Выполнен анализ моделей прогнозирования эрозии пластичных материалов, а также подходов к моделированию процесса средствами вычислительной газодинамики и явной динамики. Показано, что CFD-подход позволяет определить траектории частиц, зоны воздействия и параметры соударения, однако количественный прогноз износа ограничивается областью применимости полуэмпирических моделей. Явная динамическая постановка обеспечивает прямое моделирование локального взаимодействия частицы и поверхности, но требует отдельной валидации по экспериментальным данным. На основании анализа сформулирована необходимость разработки связной инженерной методики прогнозирования эрозионного износа твердыми частицами деталей тракта ГТД, объединяющей указанные подходы.

Во второй главе выполняется численное моделирование процесса эрозии в условиях компрессора ГТД с применением двух подходов: газодинамики и явной динамики, оценено влияние параметров процесса и настроечных коэффициентов моделей.

Расчет газовой фазы проводится в Эйлеровой постановке для проточной части модельного осевого компрессора, характерного для вертолетного турбовального двигателя. Расчетная область включала проточную часть (рис. 1 поз. 1) от входного устройства до входного направляющего аппарата (рис. 1 поз. 2), пять рабочих (рис. 1 поз. 3) и пять направляющих лопаточных венцов (рис. 1 поз. 4) осевого компрессора. Области рабочих колес задаются вращающимися со скоростью 30250 об/мин. В качестве граничных условий задаются расход воздуха на входе (рис. 1 поз. 5) и статическое давление на выходе (рис. 1 поз. 6).

В результате расчета определяются зоны воздействия твердых частиц на лопатки и распределения плотности эрозионного износа, использованные для качественной оценки поверхностей, наиболее подверженных износу. Показано, что

лопатки первой рабочей ступени изнашивается по входной кромке до $2/3$ высоты лопатки со стороны корыта, второй рабочей ступени – по входной кромке начиная примерно с $1/3$ высоты до периферии, а последующих рабочих ступеней изнашиваются преимущественно в периферийной зоне (рис. 2). Переотражение частиц обуславливает также износ спинок рабочих лопаток (рис. 3).

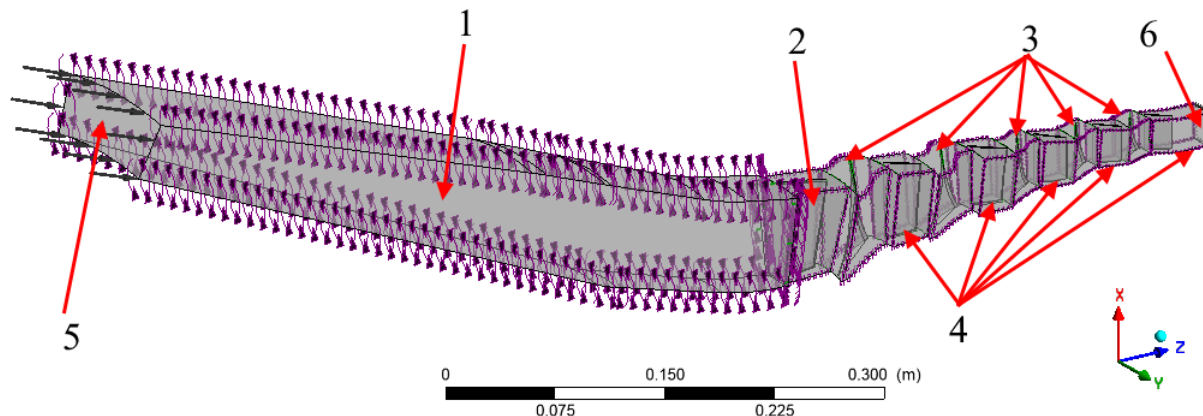


Рисунок 1 – Расчетная область

Расчетная сетка, построенная в ANSYS TurboGrid, содержит около 24 млн гексаэдральных ячеек; сеточная сходимость оценивается по значениям полного давления и полной температуры. При использовании модели турбулентности $k-\omega$ SST обеспечивалось значение параметра y^+ ниже 3 на поверхностях лопаток, полок, втулочной и периферийной стенок тракта для прямого расчета пограничного слоя на стенках расчетной области. Частицы песка моделируются как материальные точки в Лагранжевой постановке с двусторонним взаимодействием с воздушным потоком; число траекторий ограничивалось 20000, массовый расход частиц принимался 3,5 г/мин, что соответствовало концентрации 1 г/м^3 на входе, характерной для вертолетных двигателей при взлете и зависании около поверхности земли.

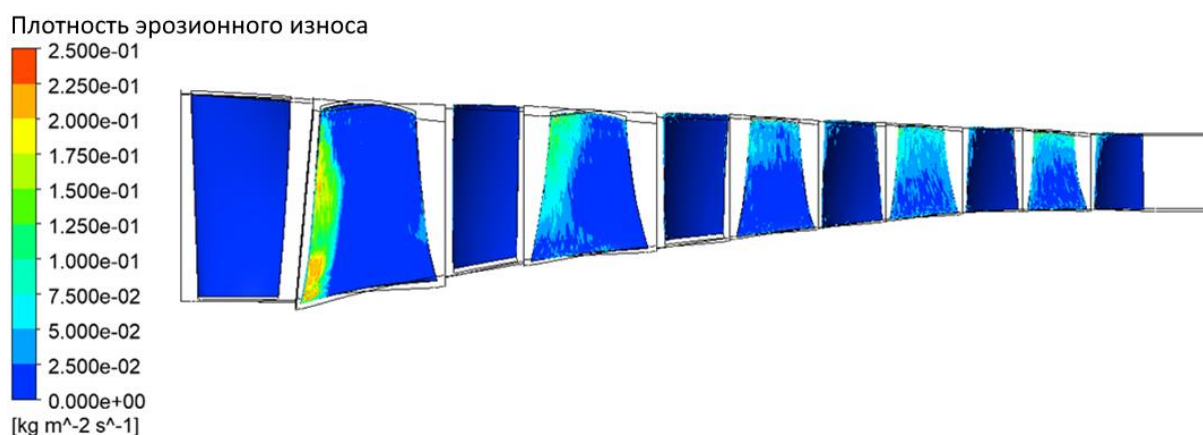


Рисунок 2 – Распределение плотности эрозионного износа (показаны поверхности корытца рабочих лопаток и спинки направляющих лопаток)

Картина распределения эрозионного износа по поверхностям деталей показывает неравномерность воздействия частиц и подтвердила необходимость дополнительного локального повышения эрозионной стойкости поверхностей лопаток, помимо серийных способов повышения стойкости.

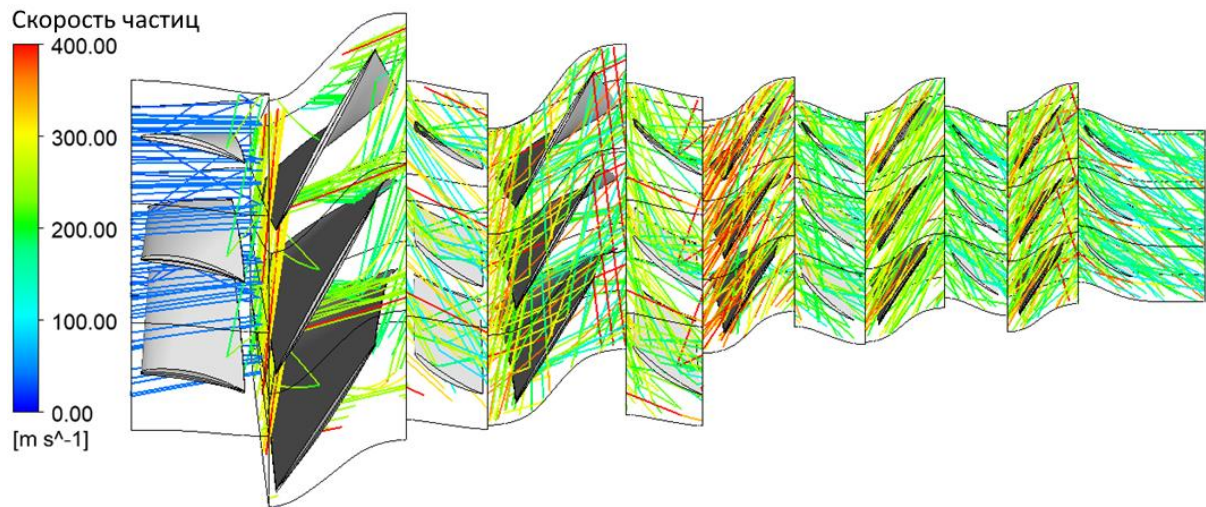


Рисунок 3 – Траектории 50 представительных частиц в проточной части компрессора

По результатам газодинамического моделирования установлено, что скорости воздействия частиц для всех ступеней, кроме входного направляющего аппарата, находятся в диапазоне 100–325 м/с, а для входного направляющего аппарата составляют 20–100 м/с. Наиболее часто частицы сталкиваются с поверхностью лопаток под углами 25–30°; общий диапазон углов составляет 5–65°. Пример распределения скоростей и углов воздействия для рабочих лопаток приведен на рис. 4. Температура стенок, при которой происходит процесс эрозии в тракте компрессора, составляла от 300 К на входе до 500 К в направляющем аппарате пятой ступени.

В газодинамической постановке также проводится исследование влияния диаметров частиц на условия воздействия на стенку. В расчетах, выполненных при одинаковых условиях работы компрессора, последовательно задавались монодисперсные частицы размером 100, 160, 200, 250, 315 и 400 мкм, что позволило оценить изменение частотных распределений скоростей и углов воздействия. Показано, что для рабочих лопаток нижняя и верхняя границы скоростей столкновения при изменении диаметра частиц сохранялись: нижняя граница составляла порядка 100 м/с, верхняя — около 325 м/с. Увеличение диаметров частиц приводило к смещению пиковых значений частотных распределений углов воздействия к большим значениям: для первой и второй ступеней пиковые значения различаются примерно на 10° для частиц диаметром 100 и 400 мкм, для последующих ступеней разница составляет 5°.

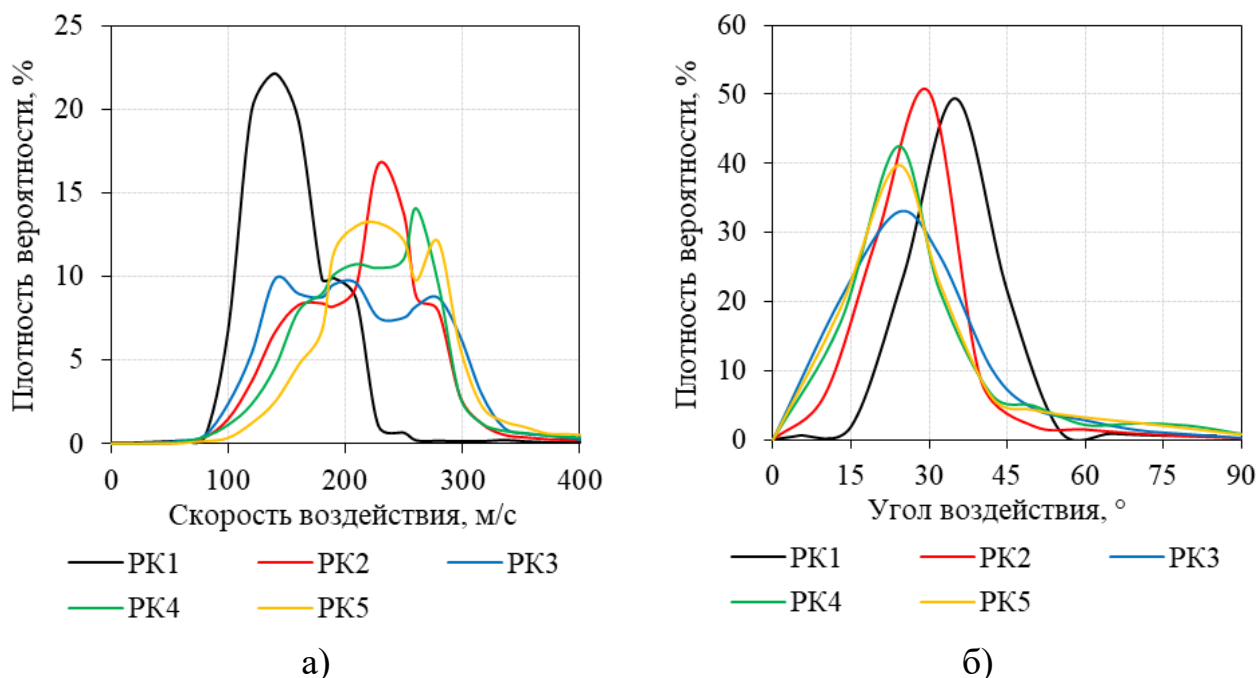


Рисунок 4 – Частотные распределения скоростей (а) и углов (б) столкновения частиц с поверхностью лопаток рабочих колес (РК)

Для прямого моделирования эрозионного взаимодействия разработана конечно-элементная модель образца и твердых частиц в явной динамической псевдодвумерной постановке в расчетном комплексе LS-DYNA (рис. 5), которая позволяет напрямую учитывать физико-механические свойства взаимодействующих материалов, а также модификацию поверхностного слоя деталей при различных способах обработки, в том числе наличие остаточных напряжений. Образец из титанового сплава Ti6Al4V (аналог ВТ6) имеет размеры 7×2 мм, область сгущения сетки - 1,58×0,16 мм; материал образца описывается моделями пластичности и разрушения Джонсона-Кука, а частицы песка – моделью Джонсона-Холмквиста для хрупких материалов. В расчетах используются углы соударения 25° (наиболее вероятный угол воздействия), 55° и 85° (представительные средний и близкий к нормальному углы). Модель обеспечивает прямой расчет последовательных соударений 200 частиц, расположенных случайным образом над поверхностью образца и определение скорости эрозии.

При исследовании установлено, что размер ячейки сетки образца, при котором сеточное разрешение перестает влиять на скорость эрозионного износа, составляет 1/100 диаметра частицы; в расчетах принят размер 2,5 мкм. Необходимое число частиц для получения устойчивого значения износа для данной постановки составляет 200. Показано, что уменьшение времени между началом движения последовательных частиц в 10 раз не влияет на результат расчета, при общем сокращении расчётного времени (пример эрозии образца в расчетной модели приведен на рис. 6).

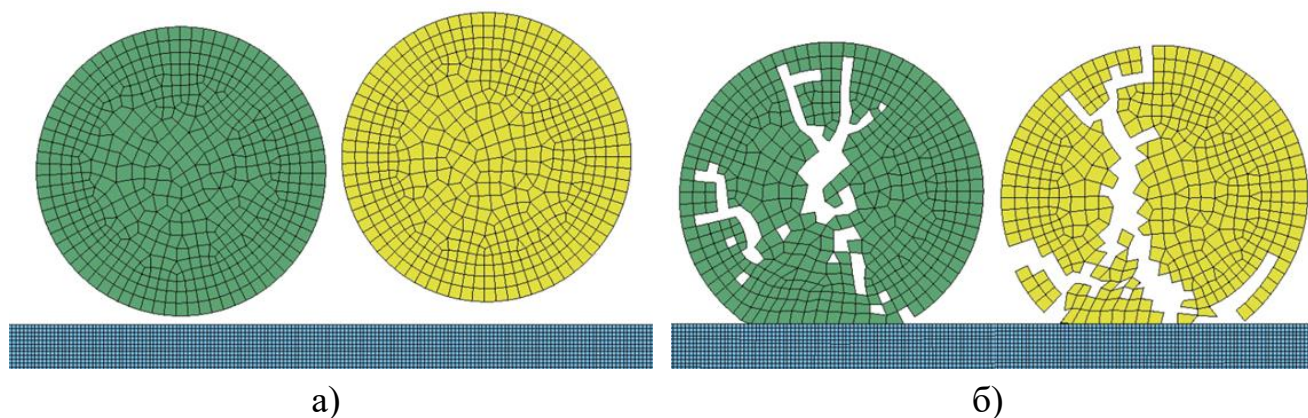


Рисунок 5 – Сеточные модели образца и твердых частиц при явном динамическом расчете: а) до столкновения, б) после столкновения

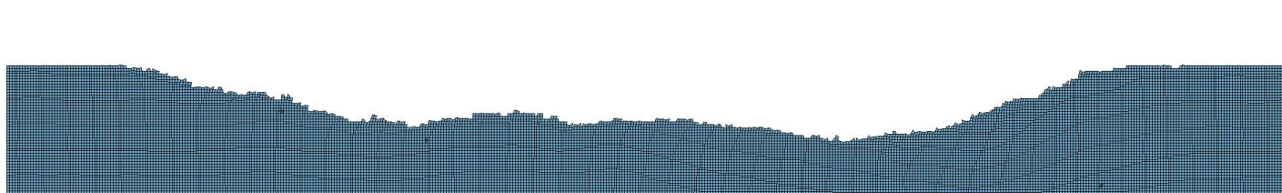


Рисунок 6 – Эрозия твердыми частицами сеточной модели образца после воздействия 200 частиц

Далее исследуется влияние значений настроечных коэффициентов модели пластичности материала на расчетную зависимость скорости эрозионного износа от угла воздействия частиц. Рассмотрены наиболее распространенные наборы коэффициентов модели пластичности Джонсона-Кука для Ti6Al4V; для детального сравнения выбраны четыре представительных набора: Khan, Bois, Leseur и Meyer. При использовании коэффициентов модели разрушения Джонсона-Кука с перечисленными выше наборами коэффициентов пластичности из оригинальной работы Джонсона и Кука было установлено, что выбор набора коэффициентов модели пластичности влияет преимущественно на количественный уровень скорости износа, тогда как качественная форма зависимости от угла воздействия сохраняется (рис. 7а).

Далее было исследовано влияние значений настроечных коэффициентов модели разрушения материала. На основании анализа уравнения модели разрушения материала Джонсона-Кука было выявлено, что настроечные коэффициенты оказывают мультипликативное влияние на разрушение материала, т.е. значения коэффициентов модели разрушения D_1 - D_3 , D_4 , D_5 независимо друг от друга влияют на расчетную зависимость скорости эрозии твердыми частицами. Так, сравнение двух наборов коэффициентов разрушения Джонсона-Кука показало, что коэффициенты D_1 - D_3 (определяющие чувствительность модели разрушения к напряженно-деформированному состоянию при воздействии частицы) оказывают определяющее влияние как на численные значения износа, так и на характер зависимости от угла воздействия (рис. 7б).

Полученные результаты позволяют выбрать набор коэффициентов модели пластичности Khan как базовый для дальнейшей валидации динамической модели эрозионного износа титановых сплавов, поскольку он дает усредненные значения скорости износа по сравнению с другими рассмотренными наборами. Также с помощью значений коэффициентов модели разрушения D_1 - D_3 возможно корректировать качественный и количественный вид расчетной зависимости эрозии.

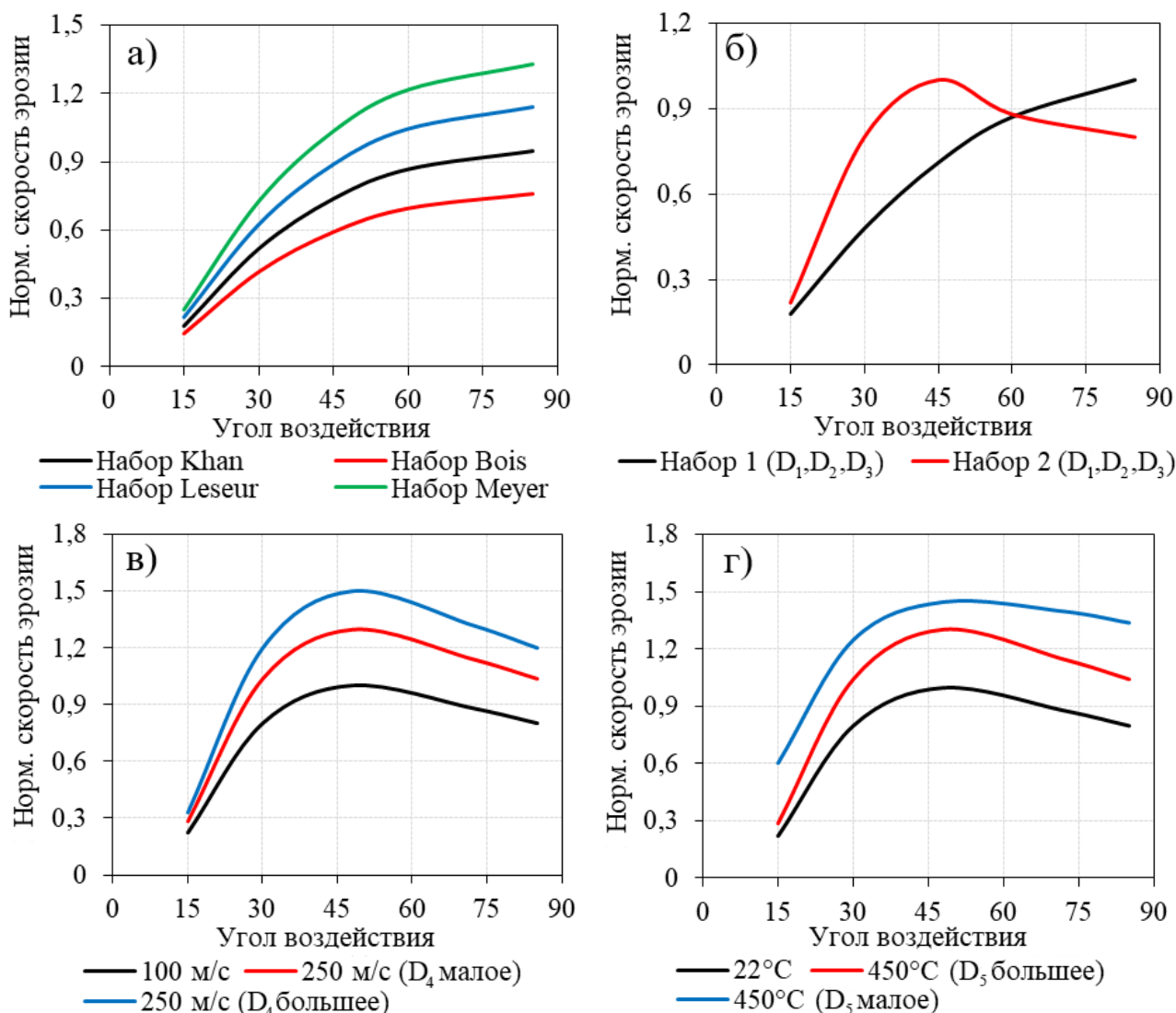


Рисунок 7 – Влияние значений коэффициентов модели пластичности и разрушения на расчетные скорости эрозии: а) набор коэффициентов модели пластичности; б) значений коэффициентов D_1 - D_3 модели разрушения; в) значения коэффициента D_4 модели разрушения; г) значения коэффициента D_5 модели разрушения

Отдельно исследуется влияние коэффициента D_4 , отвечающего за чувствительность модели разрушения Джонсона-Кука к скорости деформации. Для этого выполнены расчеты при варьировании D_4 на $\pm 50\%$ и скоростях столкновения частиц 100 м/с и 250 м/с при температуре 22 °С и углах 25, 55 и 85°. Установлено, что коэффициент D_4 практически не изменяет качественный вид зависимости

скорости эрозионного износа от угла воздействия, однако существенно влияет на относительную разницу между кривыми, полученными при различных скоростях частиц (рис. 7в). При $D_4 = 0,007$ средняя разница между кривыми для скоростей 250 м/с и 100 м/с составляет 25,1 %, при $D_4 = 0,014$ равна 33,6%, при $D_4 = 0,021$ 39,8 %. Следовательно, данный коэффициент может использоваться для калибровки модели разрушения по чувствительности к скорости воздействия частиц.

Коэффициент D_5 , характеризующий влияние температуры в модели разрушения, исследован при варьировании на ± 50 %, температурах поверхности образца 22°C и 450 °C (при данной температуре материал ВТ6 охраняет свои механические свойства при длительной эксплуатации), скорости столкновения частиц 275 м/с и углах 25, 55 и 85°. Показано, что D_5 существенно влияет на относительную разницу между зависимостями, полученными при различных температурах (рис. 7г): при $D_5 = 1,93$ средняя разница составляет 35,1 %, при $D_5 = 3,87$ равна 20,8 %, при $D_5 = 5,81$ составляет -10,8 %. Следовательно, данный коэффициент может использоваться для калибровки модели разрушения по температурной чувствительности, вплоть до случая, когда расчетный износ при высокой температуре оказывается ниже, чем при комнатной. Также установлено, что значение D_5 влияет на форму зависимости скорости эрозии от угла падения: при $D_5 = 1,93$ зависимость приобретает близкий к линейному характер, а при $D_5 = 5,81$ кривая имеет выраженный пик.

Таким образом, в результате численного исследования обоснованы основные параметры расчетной модели эрозионного воздействия твердых частиц на титановый сплав Ti6Al4V (аналог ВТ6) в явной динамической постановке: размер ячейки сетки в зоне взаимодействия составляет 1/100 диаметра частицы (2,5 мкм), число частиц – 200. Установлено, что коэффициенты модели разрушения D_1 - D_3 , D_4 и D_5 независимо влияют на скорость эрозионного износа: D_1 - D_3 определяют качественный вид кривой и положение максимума эрозии, D_4 задает чувствительность к скорости частиц, а D_5 – температурную чувствительность и частично форму зависимости. Данное свойство позволяет последовательно корректировать значения коэффициентов при валидации расчетной модели по экспериментальным данным с последующей проверкой их совместного влияния на зависимость «скорость износа – угол воздействия».

В третьей главе представлены материалы, оборудование, условия и результаты экспериментального исследования эрозионного износа титанового сплава ВТ6 твердыми частицами. Использовались образцы двух типоразмеров: 85×20×2 мм для угла воздействия частиц 25° и 42×20×2 мм для углов 55° и 85°. Образцы вырезаются на электроэрозионном оборудовании с последующим шлифованием до шероховатости Ra 1,6 мкм, подвергаются отжигу при 800 °C с выдержкой 2 ч и последующим охлаждением в печи до 100 °C, затем на воздухе.

В половине образцов с помощью лазерной ударной обработки на установке LS85, разработанной на базе кафедры 205 МАИ, формируются сжимающие остаточные напряжения с максимальным значением -300 МПа и глубиной залегания 0,3 мм (измеряются методом академика Давыденкова и на рентгеновском дифрактометре StressX), а также степень наклепа поверхностного слоя в 18 % (измеряется на микротвердомере ПМТ-3М согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке 2 Н). Режим лазерной обработки включал 60 % перекрытия лазерного пятна и удельную мощность 5,56 ГВт/см². В качестве твердых частиц использовался окатанный кварцевый песок фракции 160–315 мкм.

В ходе испытаний на эрозионном стенде регулировались расход и температура несущей фазы, а также расход твердой фазы. Унос массы определялся как разность массы образца до и после испытания, а скорость эрозии – как отношение уноса массы материала к массе воздействовавших частиц по ПНСТ 527-2021. Масса контролировалась на аналитических весах Vibra HTR-220CE с дискретностью 0,0001 г. Скорость частиц измерялась методом треков. Время воздействия на одном режиме составляло 300 с, расход твердых частиц - 0,27 г/с.

Программа экспериментов включала углы воздействия 25°, 55° и 85°, температуры 22 и 450 °С, скорости воздействия 100 м/с и 250–275 м/с, а также два состояния поверхностного слоя: без остаточных напряжений и с остаточными напряжениями -300 МПа. Полученные зависимости скорости эрозионного износа от угла воздействия качественно соответствуют характеру эрозии пластичных материалов: максимальная эрозия наблюдается при 55°, минимальная - при 25°, а при угле 85°, наблюдаются средние значения износа (рис. 8), при этом упрочнение снижает скорость износа в среднем на 12% для всех углов.

В результате показана тенденция положительного влияния сжимающих остаточных напряжений, созданных методом лазерной ударной обработки на скорость эрозионного износа сплава ВТ6. При малых углах воздействия (25°) скорость износа уменьшается в среднем на 17 %, при средних углах (55°) примерно на 7 %, при больших углах (85°) на 10 %. При малых углах, по-видимому, основной вклад в уменьшение износа связан с наклепом поверхностного слоя, поскольку преобладает механизм микрорезания; при больших углах возрастает роль сжимающих остаточных напряжений, влияющих на уменьшение усталостного разрушения вследствие накопления повреждений на поверхности.

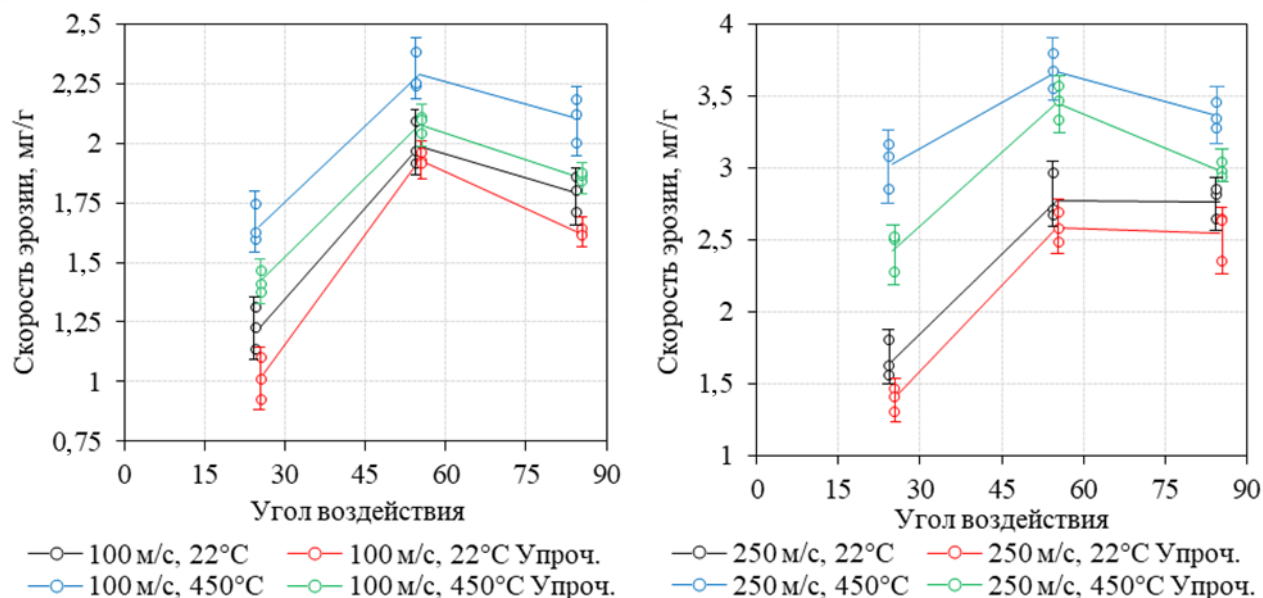


Рисунок 8 – Экспериментальные зависимости скорости эрозионного износа сплава ВТ6 от угла воздействия при скоростях 100 м/с и 250 м/с и температурах процесса 22 °С и 450 °С

В четвертой главе выполняется валидация расчетной модели эрозионного износа и сформирована методика прогнозирования эрозии поверхностей лопаток компрессоров ГТД. Валидация проводится по экспериментальным данным с применением адаптивной однокритериальной оптимизации (Adaptive Single-Objective, ASO), включающей заполнение пространства параметров, построение поверхности отклика на основе метамодели Кригинга (Kriging metamodels) и поиск оптимальных значений градиентным методом NLPQL.

Метамодель Кригинга подходит для аппроксимации дорогих, сложных или нелинейных моделей, особенно когда число расчетных точек ограничено.

Градиентный метод NLPQL для поиска оптимальных значений выбирается в связи с тем, что целевая функция оптимизации сильно нелинейно зависит от входных переменных.

Определение коэффициентов модели разрушения Джонсона-Кука выполняется поэтапно. Сначала находились значения коэффициентов D_1 - D_3 , отвечающих за качественный и количественный вид зависимости скорости эрозии от угла воздействия. Затем определялся коэффициент D_4 , описывающий влияние скорости частиц, и коэффициент D_5 , определяющий влияние температуры процесса. После раздельной оптимизации выполнялась проверка комплексного действия коэффициентов и корректировка D_1 - D_3 .

Целевая функция поиска – сумма квадратов отклонений расчетной зависимости от экспериментальной, при которой она минимизируется.

В результате оптимизации и совместной корректировки определяются значения коэффициентов модели разрушения Джонсона-Кука: $D_1 = 0,06$, $D_2 = 0,31$, $D_3 = -1,09$, $D_4 = 0,016$, $D_5 = 3,41$. Расчетная модель достаточно точно описывает

эрозионный износ сплава ВТ6 твердыми частицами в условиях, приближенных к работе компрессора турбовального двигателя (рис. 9), среднее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями составляет 5,3 %, наименьшее расхождение составляет 0,6 %. Наибольшее различие расчетных и экспериментальных данных наблюдается при скорости 250 м/с и температуре 450 °С и равно 14,5 %, что, по-видимому, связано с ограничением моделей Джонсона-Кука, в которых влияние скорости деформации, связанной со скоростью воздействия частиц) и температуры учитывается как независимое.

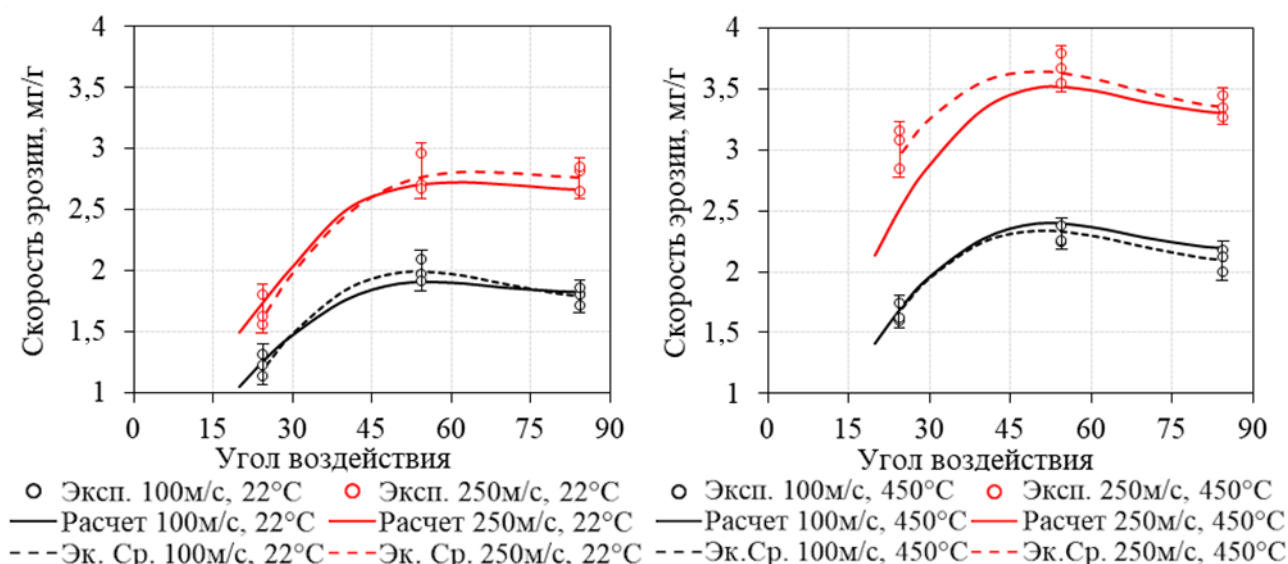


Рисунок 9 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений эрозионного износа без учета остаточных напряжений

Для проверки влияния остаточных напряжений в расчетную вводится распределение напряжений, соответствующее экспериментальным образцам: максимальное значение сжимающих напряжений в поверхностном слое составляло -300 МПа, глубина залегания 0,3 мм (рис. 10).

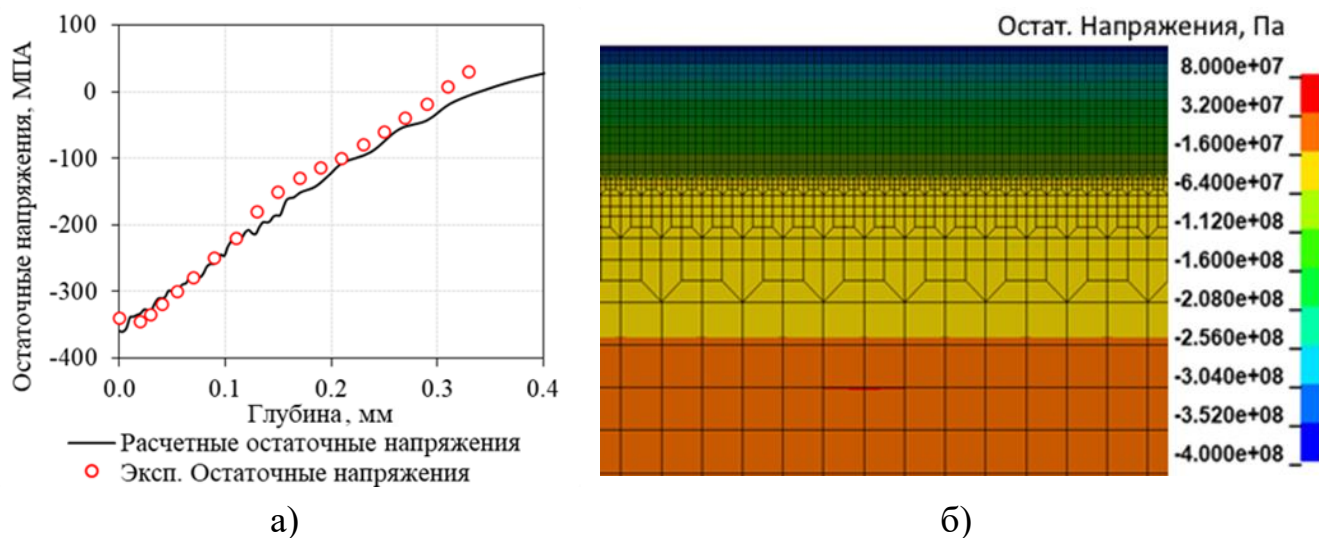


Рисунок 10 – Сравнение остаточных напряжений в эксперименте и расчете (а); распределение остаточных напряжений в модели образца (б)

Расчетная модель показывает уменьшение эрозионного износа во всем диапазоне параметров: в среднем на 6,3 % при угле воздействия 25°, на 9,7 % при 55° и на 13,5 % при 85°. Среднее отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет 8,4 % (рис. 11), максимальное 19,3 %. Достаточно значимая разница в результатах, возможно, объясняется неучтенными в модели изменениями механических свойств и структуры поверхностного слоя после лазерной ударной обработки, требует отдельного исследования и последующего учета при расчетах.

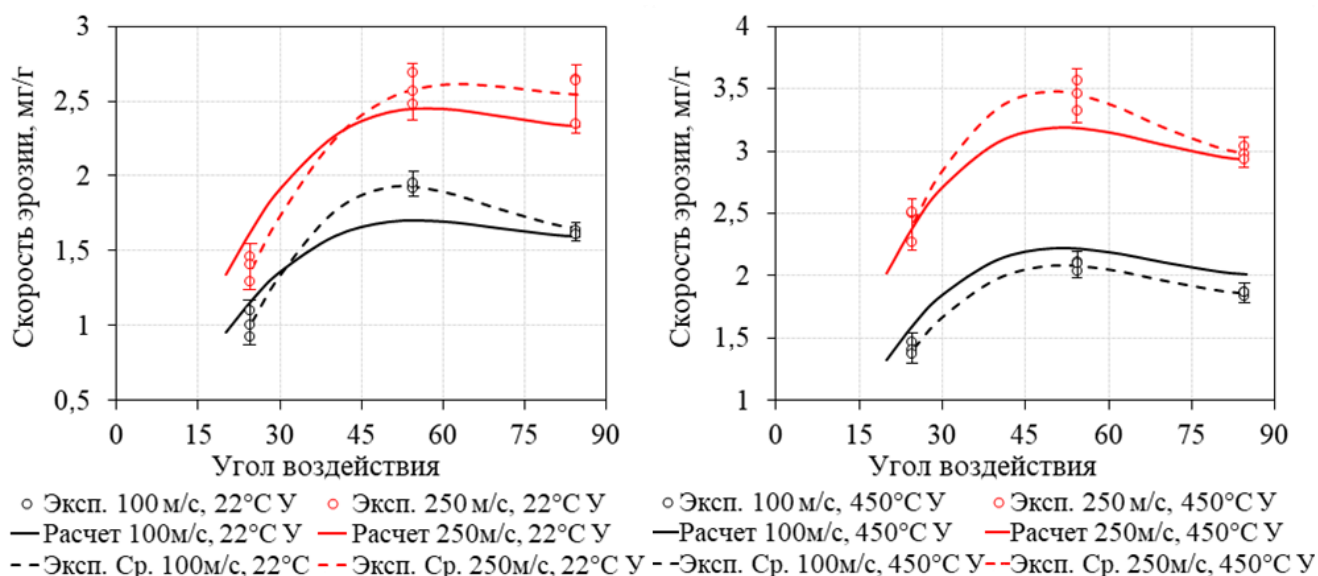


Рисунок 11 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений эрозионного износа с учетом остаточных напряжений в поверхностном слое

На основе результатов расчетных и экспериментальных исследований предлагается методика прогнозирования эрозионного износа поверхностей лопаток компрессоров ГТД твердыми частицами (рис. 12). Методика включает два основных этапа: газодинамический расчет проточной части компрессора с определением зон воздействия частиц, распределений скоростей и углов воздействия и температуры процесса; расчет в явной динамической постановке взаимодействия частиц с материалом поверхности с учетом физико-механических свойств, моделей пластичности и разрушения, распределения размеров частиц, температуры и остаточных напряжений.

Методика предполагает переход от геометрии и условий работы компрессора к параметрам локального контакта частиц с поверхностью и расчетному прогнозу эрозионного износа.

На основе прогноза зон, наиболее подверженных эрозии, и оценки скорости износа можно локально модифицировать поверхностный слой, например, сформировать наклеп и сжимающие остаточные напряжения методами поверхностного пластического деформирования, в т.ч., методом лазерной ударной обработки. Хотя область применимости методики ограничена валидацией модели

на основе сплава ВТ6, а также диапазонами скоростей 100–250 м/с (до 275 м/с) и температур 22–450 °С, она может быть расширена на другие материалы и режимы за счет дополнительных экспериментальных исследований и корректировки коэффициентов моделей.

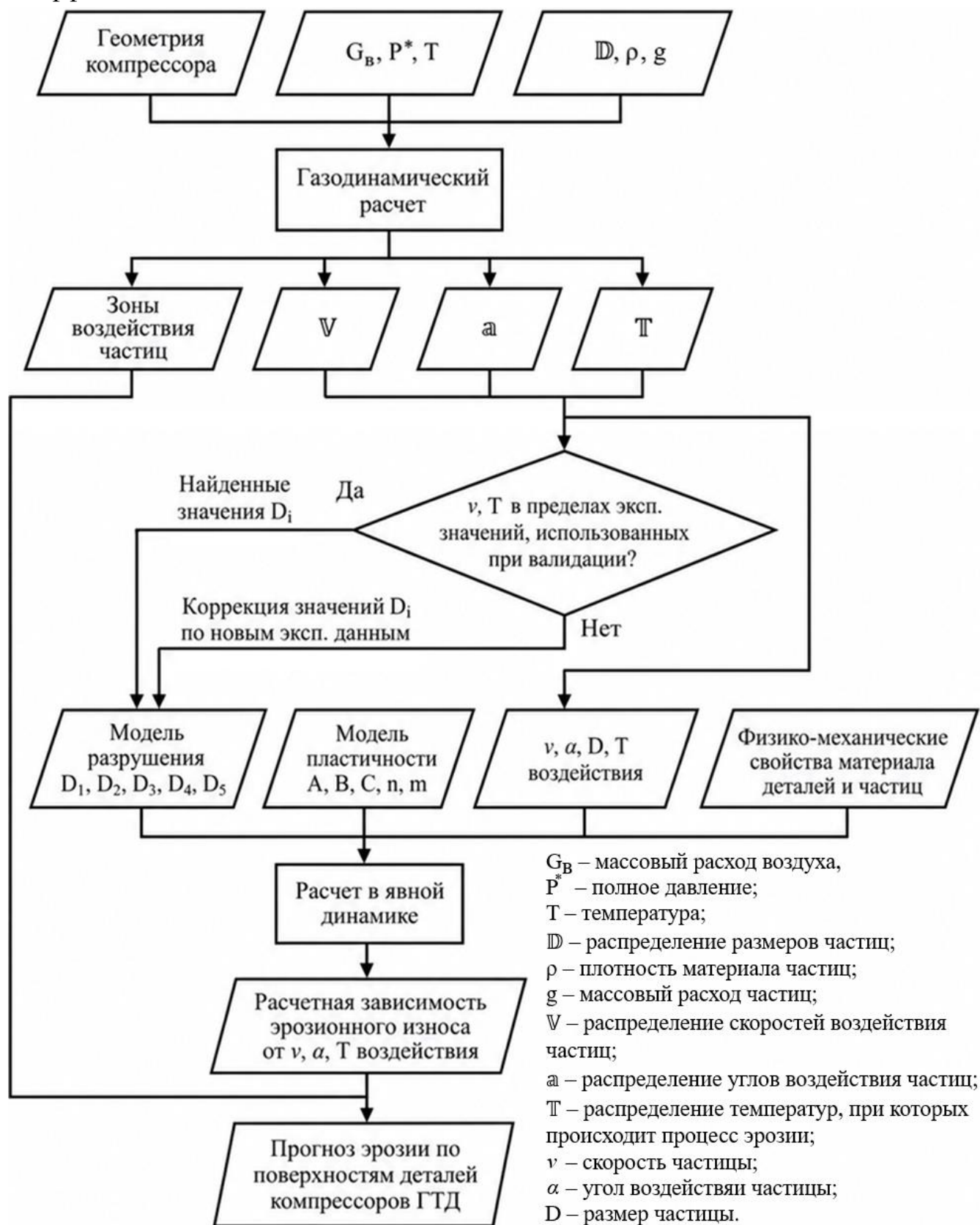


Рисунок 12 – Схема методики прогнозирования эрозионного износа твердыми частицами деталей компрессора

Несмотря на определенные границы валидации математических моделей в данной работе, методика прогнозирования и выводы, полученные при ее разработке, при необходимых допущениях могут быть распространены на широкий спектр условий.

Результаты, полученные при вычислительных исследованиях и при разработке методики прогнозирования эрозии твердыми частицами, могут быть применены для более широкого круга задач в различных отраслях машиностроения: в автомобилестроении, кораблестроении и при проектировании ГТУ и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ условий возникновения, способов прогнозирования и методов моделирования эрозионного износа, а также способов повышения эрозионной стойкости компрессорных лопаток авиационного двигателя.

2. Средствами вычислительной газодинамики определены условия взаимодействия твердых частиц с поверхностью лопаток компрессора типового турбовального двигателя вдоль всей проточной части. Установлены статистические распределения скоростей и углов воздействия твердых частиц на поверхности рабочих и направляющих лопаток.

3. Построена модель процесса эрозионного износа твердыми частицами на основе метода явной динамики, проведен анализ чувствительности модели к граничным и начальным условиям, выбору значений настроечных коэффициентов моделей пластичности и разрушения. Показано независимое влияние коэффициентов D_1 – D_3 , D_4 и D_5 модели разрушения материала под воздействием частиц на характер и численные значения зависимости скорости эрозионного износа от угла воздействия твердых частиц.

4. Определено влияние остаточных напряжений на эрозионную стойкость сплава ВТ6 средствами явного динамического анализа. Модель показывает положительное влияние сжимающих остаточных напряжений, наведенных методом лазерной ударной обработки в поверхностном слое, с амплитудой -300 МПа на эрозионную стойкость; наблюдается уменьшение эрозионного изнашивания твердыми частицами титанового сплава ВТ6 для скоростей воздействия частиц от 100 м/с до 275 м/с и температур процесса от 22°C до 450°C.

5. Экспериментально определена эрозионная стойкость образцов из сплава ВТ6 с параметрами потока, приближенными к компрессору авиационного двигателя, при наличии и отсутствии остаточных напряжений в поверхностном слое. Показана тенденция положительного влияния лазерной ударной обработки на эрозионную стойкость.

6. На основании экспериментальных данных валидирована модель эрозионного износа твердыми частицами титанового сплава в явной динамической постановке, найдены коэффициенты модели разрушения, при которых прогноз эрозии в среднем дает погрешность 8,4 % от экспериментальных результатов. Приведена методика коррекции значений коэффициентов на основании экспериментальных данных.

7. Разработана методика и даны рекомендации по определению эрозионной стойкости (модель прямого расчета взаимодействия частица/поверхность, влияние значений настроечных коэффициентов модели, внесение остаточных напряжений в поверхностный слой как способ защиты) поверхностей лопаток с учетом поверхностных остаточных напряжений, на ранних стадиях проектирования компрессоров ГТД и по способам её повышения. Определены область её применимости и ограничения. Сформулированы необходимые условия расширения методики для применения при иных параметрах процесса эрозионного износа и других сплавов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним:

1. Пожидаев А. А., Строкач Е. А., Кожевников Г. Д. Численное моделирование процесса эродирования твердыми частицами в газовом потоке (обзор) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – №67. – С. 56-69.

2. Пожидаев А. А., Строкач Е. А. Моделирование нагрева и остаточных напряжений в титановом сплаве при обработке стальной дробью // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 12. С. 565-571.

3. Pozhidaev A.A., Strokach E.A., Kozhevnikov G.D., Dobrovolsky S.V. Numerical study of titanium alloy high-velocity solid particle erosion. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 268–283. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283. (In Russian).

4. Pozhidaev A.A., Strokach E. A. Numerical study of SiO₂ particle erosion of an aluminum alloy // Scientific and technical journal of information technologies mechanics and optics. – 2025. – Т. 25. – №. 1. – С. 140-150.

Публикации в других научных изданиях:

5. Исследование технологии лазерного ударного упрочнения в авиационной промышленности / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, А. А. Пожидаев, М. А. Ляховецкий // Гагаринские чтения – 2020 : сборник тезисов докладов XLVI Международной молодежной научной конференции, Москва, 14–17 апреля 2020 г. – Москва : Изд-во МАИ, 2020. – С. 159.

6. Строкач, Е. А. Численное моделирование эрозионного износа твёрдыми частицами в газовом потоке / Е. А. Строкач, Г. Д. Кожевников, А. А. Пожидаев // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : тезисы, Москва, 23–27 ноября 2020 г. – Москва : Издательство «Перо», 2020. – С. 191–193. – ISBN 978-5-00171-704-1.

7. Исследование технологии лазерного ударного упрочнения в авиационной промышленности / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королёв, А. А. Пожидаев, М. А. Ляховецкий // Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование : материалы I Международной молодежной научной конференции, Москва, 21–24 апреля 2020 г. – Москва : Международный Информационный Нобелевский Центр «Нобелистика», 2020. – С. 68–69.

8. Пожидаев, А. А. Численное моделирование процесса эрозии твердыми частицами на базе метода явного динамического анализа / А. А. Пожидаев, Г. Д. Кожевников, Д. А. Токачев // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : тезисы, Москва, 21–25 ноября 2022 г. – Москва : Издательство «Перо», 2022. – С. 160–161. – ISBN 978-5-00204-819-9.

9. Пожидаев, А. А. Численное моделирование процесса дробеударной обработки материалов, используемых при производстве деталей ДЛА / А. А. Пожидаев // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : тезисы, Москва, 20–24 ноября 2023 г. – Москва : Издательство «Перо», 2023. – С. 101–102. – ISBN 978-5-00218-957-1.

10. Строкач, Е. А. Моделирование дробеударного формообразования: краткий обзор современных работ / Е. А. Строкач, А. А. Пожидаев // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 10–12 апреля 2024 г. / отв. ред. А. Р. Галлямов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. – С. 75–78. – ISBN 978-5-7964-2445-2.

11. Пожидаев, А. А. Численное моделирование эрозионного износа деталей тракта газотурбинного двигателя / А. А. Пожидаев // 24-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : тезисы, Москва, 17–21 ноября 2025 г. – Москва : Издательство «Перо», 2025. – С. 90–91. – ISBN 978-5-00270-434-7.