

621.431.75  
Т 38

*В.А. Богуслаев, П.Д. Жеманюк, А.Я. Качан,  
А.И. Долматов, Э.И. Цивирко, В.Ф. Мозговой*

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ГТД

ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА  
И ВЕНТИЛЯТОРА

часть I

Запорожье 2017

*В. А. Богуслаев, П. Д. Жеманюк, А. Я. Качан,  
А. И. Долматов, Э. И. Цивирко, В. Ф. Мозговой*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ГТД**

**ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА И ВЕНТИЛЯТОРА**

часть I

МОНОГРАФИЯ

Издание второе, переработанное и дополненное

Запорожье, 2017

ББК 621.431.75  
Т-38  
УДК 539.4:621.438

Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография. Изд. 2-е, переработанное и дополненное, г. Запорожье, изд. АО «Мотор Сич», 2017 г. – 500 с.

Авторы: Богуслаев В. А., Жеманюк П. Д., Качан А. Я., Долматов А. И., Цивирко Э. И., Мозговой В. Ф.

Рецензенты:

профессор, доктор технических наук Титов Вячеслав Андреевич,  
профессор, доктор технических наук Кривов Георгий Алексеевич.

Утверждено к печати Научно-техническим советом АО «Мотор Сич»

В монографии изложены вопросы современного состояния изготовления лопаток компрессора ГТД и рассмотрены основные закономерности формирования характеристик их поверхностного слоя. Приведены результаты испытаний на усталость, ударную прочность и износостойкость лопаток после упрочняющей обработки и нанесения покрытий.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников авиационной и космической отраслей, а также может быть использована студентами университетов соответствующих специальностей

ISBN 978-966-2906-68-4

© Богуслаев В. А.,  
Жеманюк П. Д.,  
Качан А. Я.,  
Долматов А. И.,  
Цивирко Э. И.,  
Мозговой В. Ф.

© АО «Мотор Сич»

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	10
Раздел 1	
<b>Конструктивные характеристики лопаток компрессора и особенности технологических методов формообразования их заготовок пластическим деформированием.....</b>	<b>13</b>
1.1 Конструктивные характеристики лопаток.....	13
1.2 Формообразование пера лопаток компрессора методами пластического деформирования.....	23
1.3 Деформации при изготовлении лопаток компрессора методами пластического деформирования.....	27
1.4 Аналитическое определение профиля заготовки лопатки и рабочей части валков при периодической прокатке с последующим холодным вальцеванием.....	36
1.5 Технология изготовления спрямляющей лопатки вентилятора штамповкой с последующей прокаткой.....	46
1.6 Влияние формы поперечного сечения исходной заготовки пера лопатки на деформации при ее вальцевании.....	53
1.7 Энергосиловые параметры пластического формообразования лопаток компрессора.....	57
1.8 Распределение контактных давлений по поверхности пера лопатки при точной штамповке.....	60
1.9 Поле температур поверхности контакта заготовки лопатка-штамп.....	61
1.10 Точность вальцевания пера лопаток.....	65
1.11 Комплексное влияние исходных размеров заготовок и энергосиловых параметров вальцевания на геометрические параметры лопаток.....	75
1.12 Технологическая наследственность свойств поверхностного слоя заготовок лопаток, полученных методами пластического деформирования.....	78
1.12.1 Технологическая наследственность свойств поверхностного слоя пера лопаток после холодного вальцевания.....	82

1.12.2 Влияние технологических процессов точной штамповки и холодного вальцевания пера рабочих лопаток компрессора из жаропрочных сплавов на качество их изготовления.....	85
1.12.3 Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора из титанового сплава на качество их изготовления.....	105
1.12.4 Влияние технологической наследственности различных вариантов технологии изготовления лопаток на их несущую способность.....	120
Литература.....	122

## Раздел 2

### **Формообразование аэродинамических поверхностей крупногабаритных лопаток механической обработкой.....**

124

2.1 Комплексная автоматизированная система проектирования и изготовления лопаток.....	124
2.2 Формообразование аэродинамических поверхностей лопаток шлифованием.....	127
2.2.1 Влияние параметров схем формообразования на стабильность сил шлифования.....	130
2.3 Обработка профиля пера вентиляторных лопаток алмазными кругами.....	136
2.4 Формообразование входных и выходных кромок пера лопаток.....	138
2.5 Полирование аэродинамических поверхностей пера лопаток.....	144
2.6 Формообразование корневых участков отдельных лопаток.....	148
2.7 Контактные температуры в зоне шлифования.....	152
2.7.1 Осциллограммы контактных температур.....	152
2.7.2 Контактная температура при электроалмазном шлифовании и определение области бесприжоговой обработки.....	158
2.7.3 Контактная температура при ленточном шлифовании и определение области бесприжоговой обработки.....	162
2.7.4 Контактная температура в зоне шлифования кромки пера лопатки.....	168
2.8 Точность формообразования аэродинамических поверхностей.....	174

2.9 Шероховатость поверхности и ее зависимость от вида обработки.....	177
2.10 Микротвердость поверхностного слоя пера лопатки от вида ее обработки.....	180
2.11 Влияние технологической наследственности операций технологического процесса изготовления пера лопатки на распределение остаточных напряжений в поверхностном слое.....	183
2.12 Микроструктура поверхностного слоя аэродинамических поверхностей пера лопатки.....	190
Литература.....	194

### Раздел 3

## **Формообразование сложнопрофильных поверхностей лопаток и проточных поверхностей моноколес высокоскоростным спиральным фрезерованием.....**

196

3.1 Основные закономерности процесса высокоскоростного фрезерования (ВСФ).....	196
3.2 Определение граничных режимов работы сферических фрез при высокоскоростном фрезеровании.....	204
3.2.1 Выбор инструмента для черновой обработки материала.....	206
3.2.2 Шероховатость поверхностей при их высокоскоростном фрезеровании.....	208
3.3 Технология обработки деталей высокоскоростным фрезерованием.....	209
3.3.1 Основные технологические аспекты процесса высокоскоростного фрезерования .....	211
3.4 Технология обработки высокоскоростным фрезерованием осевых и центробежных моноколес компрессоров ГТД.....	214
3.4.1 Конструктивные характеристики моноколес.....	214
3.4.2 Технологические особенности обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием.....	218
3.5 Особенности колебаний деталей при высокоскоростном строчном фрезеровании.....	234
3.6 Снижение вибраций в зоне обработки нежестких, тонкостенных деталей ГТД при высокоскоростном фрезеровании.....	246
3.7 Выбор режимов высокоскоростного фрезерования по уровню вибрации.....	251
Литература.....	261

## Раздел 4

### **Физико-механические свойства двухфазных титановых сплавов**

<b>и повреждения лопаток компрессора</b> .....	262
4.1 Химический состав и фазовые превращения.....	262
4.2 Структурообразование и поверхностное насыщение.....	264
4.3 Виды повреждений лопаток компрессоров.....	283
4.4 Особенности разрушения лопаток от усталости.....	284
4.5 Эрозионные повреждения лопаток вертолетного двигателя.....	293
4.6 Повреждения технологического происхождения.....	295
Литература.....	300

## Раздел 5

<b>Отделочно-упрочняющая обработка лопаток</b> .....	301
5.1 Виброабразивная обработка пера лопаток.....	301
5.1.1 Оборудование и область применения виброабразивной обработки.....	301
5.1.2 Виброабразивная обработка в производстве лопаток.....	304
5.2 Оборудование и технологические особенности ультразвукового упрочнения деталей.....	308
5.2.1 Ультразвуковое упрочнение образцов.....	317
5.2.2 Влияние степени силового воздействия на сопротивление усталости модельных образцов из сплава ВТ9.....	323
5.3 Пневмодробеструйная обработка шариками лопаток.....	325
5.3.1 Установка для пневмодробеструйного упрочнения.....	325
5.3.2 Расчет оптимального режима пневмодробеструйного упрочнения лопаток.....	326
5.3.3 Исследование характера силового воздействия на поверхность пера лопатки при упрочнении.....	330
5.3.4 Обоснование оптимального режима ПДУ лопаток III-й степени КНД.....	333
5.4 Особенности формирования характеристик поверхностного слоя методами поверхностного пластического деформирования.....	336
5.4.1 Характеристики технологических микродефектов (концентраторов напряжений), возникающих при изготовлении лопаток.....	336

5.4.2 Формирование текстуры и структурно-фазовые изменения при температурно-силовом воздействии на поверхность пера лопаток.....	342
5.4.2.1 Влияние ультразвуковой обработки шариками пера лопаток на структурную неоднородность.....	342
5.4.2.2 Влияние технологии изготовления на текстуру лопаток ГТД.....	351
5.4.2.3 Влияние технологии изготовления лопаток компрессора на структурные изменения в сплаве ВТЗ-1.....	356
5.4.2.4 Влияние текстуры на сопротивление усталости.....	362
Литература.....	373

## Раздел 6

<b>Влияние отделочно-упрочняющей обработки на сопротивление усталости и ударную прочность лопаток.....</b>	<b>377</b>
--	------------

6.1 Влияние поверхностных дефектов на сопротивление усталости лопаток.....	377
6.2 Эффективность упрочнения лопаток при температурах.....	381
6.3 Оценка влияния методов отделочно-упрочняющей обработки на сопротивление усталости лопаток.....	384
6.4 Расчет сил при соударении лопаток и посторонних тел.....	390
6.5 Расчет напряжений в упрочненной лопатке при соударении с посторонним телом.....	391
6.6 Математическая модель коэффициента упрочнения лопаток.....	402
6.6.1 Моделирование коэффициента ультразвукового упрочнения деталей авиадвигателей.....	404
6.7 Повышение сопротивления усталости лопаток компрессора вертолетного двигателя комбинированной финишной обработкой.....	409
Литература.....	427

## Раздел 7

<b>Упрочняющая обработка лопаток компрессора ГТД микрошариками.....</b>	<b>431</b>
---	------------

7.1 Оборудование, технологические параметры и контроль режимов упрочняющей обработки микрошариками.....	431
---	-----



7.1.1 Технологические параметры при упрочняющей обработке деталей на роторной дробеструйной установке.....	434
7.1.2 Контроль режима при дробеструйной обработке деталей микрошариками.....	436
7.2 Упрочняющая обработка микрошариками образцов из титанового сплава.....	438
7.3 Влияние упрочняющей обработки микрошариками на сопротивление усталости образцов из титанового сплава.....	442
7.4 Упрочняющая обработка лопаток компрессора ГТД микрошариками в сочетании с другими методами отделочно-упрочняющей обработки.....	445
7.5 Повышение выносливости лопаток компрессора ГТД комбинированной отделочно-упрочняющей обработкой с применением микрошариков.....	451
7.6 Влияние комбинированной отделочно-упрочняющей обработки с применением микрошариков на выносливость лопаток компрессора из стали 1Х12Н2ВМФ (ЭИ961).....	460
Литература.....	464

## Раздел 8

<b>Повышение износостойкости лопаток.....</b>	<b>465</b>
8.1 Антиэрозионные покрытия лопаток компрессора.....	465
8.2 Эрозионный износ лопаток компрессора.....	471
8.3 Оценка состояния лопаток по результатам испытания изделия 78 на стенде с подачей пыли в компрессор.....	473
8.4 Исследование эрозионной стойкости покрытий при воздействии жидких и твердых частиц.....	474
8.5 Результаты экспериментальных исследований стойкости покрытий на эрозионном стенде.....	476
8.6 Метод КИБ.....	480
8.7 Исследование эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора с покрытием на основе нитрида титана.....	481
8.7.1 Методика проведения исследований.....	481
8.7.2 Результаты исследований эрозионной стойкости.....	484
8.8 Исследования эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора с покрытиями при стендовых испытаниях двигателя.....	487
8.8.1 Методика проведения исследований.....	487

8.8.2 Результаты исследований .....	490
8.9 Параметры качества рабочих лопаток I ступени компрессора с покрытием на основе нитрида титана.....	491
8.9.1 Определение твердости и микротвердости.....	491
8.9.2 Определение остаточных напряжений.....	492
8.9.3 Влияние покрытий на вес и собственные частоты колебаний лопаток.....	493
8.10 Исследования на коррозионную стойкость.....	494
8.10.1 Методика проведения исследований.....	494
8.10.2 Результаты исследований .....	495
8.11 Исследование лопаток, покрытых нитридом титана, на усталость.....	496
Литература.....	497
Заключение.....	498