

А. С. ГИШВАРОВ

**ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ
МАТЕРИАЛОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
В УСЛОВИЯХ
КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ
СРЕДЫ**



МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. С. Гишваров

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЫ



Москва
«Машиностроение»
2014

УДК 621.4:620.1

ББК 31.36:30.82

Г51

Рецензенты:

*Научно-инженерный центр «Надёжность и ресурс
больших систем и машин» УрО РАН, д-р техн. наук, профессор Тимашев С. А. ;
главный консультант ОАО «НПП «Мотор», д-р техн. наук, профессор,
почетный академик АН РБ Рыжов А. А.*

Гишваров А. С.

Г51 Повреждаемость материалов энергетических установок в условиях коррозионно-активной среды: монография / А. С. Гишваров. – М.: Машиностроение, 2014. – 296 с.
ISBN 978-5-94275-731-1

Рассматриваются теоретические и методологические основы оценки повреждаемости материалов энергетических установок при многокомпонентном нагружении в условиях коррозионно-активной среды.

Приведены основные сведения о коррозионных процессах, методах испытаний на коррозионную стойкость, влиянии коррозии на прочностные характеристики материалов. Подробно рассмотрен новый метод ускоренной экспериментальной оценки повреждаемости лопаток турбин газотурбинных установок, подверженных действию высокотемпературной газовой коррозии.

Для специалистов, непосредственно занимающихся проведением экспериментальных исследований и, в первую очередь, для научных работников НИИ и КБ, занимающихся разработкой и совершенствованием материалов деталей энергетических установок, эксплуатирующихся при многокомпонентном нагружении в условиях коррозионно-активной среды.

Табл. 65. Ил. 159. Библиогр.: 216 назв.

УДК 621.4:620.1

ББК 31.36:30.82

ISBN 978-5-94275-731-1

© ООО Издательство «Машиностроение», 2014

© А. С. Гишваров, 2014

© Уфимский государственный авиационный технический университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Основные сведения о коррозионных процессах	6
1.1. Классификация коррозионных процессов	6
1.2. Межкристаллитная и язвенная коррозии	17
1.3. Коррозионное растрескивание	20
1.4. Высокотемпературное окисление	26
1.5. Высокотемпературная газовая коррозия	36
1.5.1. Ванадиевая газовая коррозия	36
1.5.2. Сульфидно – оксидная газовая коррозия	40
Глава 2. Методы ускоренных испытаний металлов, сплавов, металлических и неметаллических покрытий на коррозионную стойкость	63
2.1. Методы ускоренных испытаний материалов на коррозионную стойкость	63
2.1.1. Ускоренные испытания материалов на атмосферную коррозию	65
2.1.2. Ускоренные испытания никелевых покрытий в морских условиях	79
2.2. Ускоренные испытания материалов на жаростойкость	86
2.3. Ускоренные испытания материалов на высокотемпературную коррозию	100
2.4. Комбинированные испытания материалов на коррозию и механическое нагружение	111
2.5. Коррозионные испытания лопаток турбин в системе газотурбинного двигателя	114
Глава 3. Влияние коррозии на прочностные характеристики материалов	116
3.1. Критерии стойкости материалов к высокотемпературной коррозии	116
3.2. Влияние коррозии на длительную прочность	127
3.2.1. Модель коррозии под напряжением	127

3.2.2. Моделирование процесса разрушения рабочих лопаток газовых турбин	129
3.2.3. Влияние золовых отложений на длительную прочность сплавов ЭИ826 и ЭИ539	132
3.2.4. Влияние наработки на прочность лопаток турбины	137
3.3. Влияние коррозии на малоцикловую прочность	141
3.3.1. Термодинамический учет влияния среды на малоцикловую прочность	141
3.3.2. Определение характеристик термической усталости	149
3.3.3. Термомеханическая усталость теплозащитных покрытий	151
3.3.4. Высокотемпературное окисление лопаток турбин при теплосменах	155
3.3.5. Разупрочнение рабочих лопаток газотурбинного двигателя в условиях циклического термического нагружения в газовом потоке с соединениями серы	159
3.3.6. Термоусталостная прочность рабочих и направляющих лопаток турбин энергетических установок	162
3.3.7. Характеристики термической усталости жаропрочных сплавов ЖС, ЖС6К и ЭП99	171
3.3.8. Влияние солей морской воды на малоцикловую прочность материалов	173
3.4. Влияние коррозии на усталость	176
3.4.1. Коррозионная усталость	176
3.4.2. Усталость турбинных лопаток энергетических установок в условиях ванадиевой коррозии	176
3.5. Повреждаемость материалов при статическом и циклическом нагружении в высокотемпературной коррозионной среде	182
3.6. Комплексная оценка повреждаемости лопаток турбин газотурбинных двигателей при разнородных видах нагружений в условиях высокотемпературной газовой коррозии	183
Глава 4. Ускоренные испытания сопловых лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию	192
4.1. Условия работы и повреждения лопаток турбин газотурбинных двигателей и энергетических установок	192
4.1.1. Условия работы лопаток турбин	192
4.1.2. Повреждения лопаток турбин, обусловленные высокотемпературной газовой коррозией	194
4.2. Особенности механизма высокотемпературной сульфидной коррозии лопаток турбин	203
4.3. Методы испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию	208
4.3.1. Испытания лопаток в системе двигателя	208
4.3.2. Автономные испытания лопаток на газодинамических стен-	

дах	209
4.3.3. Испытания лопаток в тиглях в расплавах солей	211
4.3.4. Испытания лопаток в расплавах солей с электрохимическим воздействием	214
4.3.5. Испытания лопаток с предварительным нанесением коррозионной обмазки на их поверхность	215
4.3.6. Сравнительный анализ методов испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию	216
4.4. Теоретические основы ускоренных испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию	218
4.4.1. Теоретические основы ускоренных испытаний изделий на надежность и ресурс	218
4.4.2. Теоретическое обоснование метода ускоренных испытаний сопловых лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию	230
4.5. Структура и содержание методики ускоренных испытаний сопловых лопаток турбин ГТД на высокотемпературную газовую коррозию	238
4.5.1. Общая структура методики	238
4.5.2. Содержание основных этапов методики ускоренных испытаний сопловых лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию	240
4.6. Экспериментальная апробация методики ускоренных испытаний сопловых лопаток на высокотемпературную газовую коррозию ...	262
4.6.1. Условия проведения исследования	262
4.6.2. Подготовка образцов	264
4.6.3. Травление	265
4.6.4. Электрохимическая обработка	266
4.6.5. Высокотемпературная обработка	272
4.6.6. Анализ результатов ускоренных испытаний сопловых лопаток	275
Список литературы	281