

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.А. Герасимов, Л.И. Куксенова,
В.Г. Лаптева, О.Г. Оспенникова,
М.С. Алексеева, В.И. Громов

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АЗОТИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Под общей редакцией
академика РАН, профессора Е.Н. Каблова

Допущено Федеральным Учебно-методическим объединением по укрупненной группе специальностей и направлений 22.00.00 «Технологии материалов» в качестве учебного пособия при подготовке бакалавров, магистров, обучающихся, соответственно, по направлениям 22.03.01, 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» и аспирантов, обучающихся по направлению 22.06.01 «Технологии материалов»

МОСКВА
ВИАМ
2019

УДК 669.018.29

ББК 34.2

И62

Рецензенты: профессор Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, доктор технических наук *В.Н. Малышев*; заведующий отделом Института машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, профессор, доктор технических наук *А.Н. Романов*

Герасимов С.А., Куксенова Л.И., **Лаптева В.Г.**, Оспенникова О.Г.,
Алексеева М.С., Громов В.И.

И62 Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2019. – 600 с. : ил.

ISBN 978-5-905217-47-0

В учебном пособии описаны основные задачи фрикционного материаловедения с позиций инженерии поверхности, при этом азотирование рассматривается не только как способ упрочнения поверхности, но и как метод инженерии поверхности. Изложены закономерности формирования структуры поверхностного слоя при азотировании сталей и сплавов перлитного, мартенситного и аустенитного классов в зависимости от их химического состава, плотности дефектов строения матрицы и температурно-временных параметров технологического процесса. Описаны механизмы влияния строения азотированного слоя на твердость сталей и их износостойкость. Установлены основные структурные факторы, влияющие на износостойкость сталей и контактную долговечность изделий из них. Рассмотрены принципы управления структурными факторами для достижения оптимальных значений износостойкости и контактной долговечности. Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости конструкционных материалов при трении в разных условиях. С позиций эксплуатационных требований изложена проблема выбора конструкционных материалов для узлов трения. Представлен обширный справочный материал по триботехническим характеристикам конструкционных материалов.

Издание может быть использовано преподавателями, аспирантами, студентами в качестве учебного пособия при подготовке курсовых проектов и выпускных квалификационных работ по специальности «Материаловедение и технологии материалов», а также предназначено для научных и инженерно-технических работников, конструкторов, технологов, занимающихся вопросами химико-термической обработки, трения и износа изделий машиностроения, а также может быть полезно преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

УДК 669.018.29

ББК 34.2

ISBN 978-5-905217-47-0

© ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

От издателя	10
Введение	14
Глава 1. Основы процесса азотирования	18
1.1 История азотирования конструкционных сталей и сплавов	18
1.2. Формирование азотированного слоя	26
1.3. Способы азотирования	34
1.3.1. Газовое азотирование	34
1.3.2. Ионное азотирование	40
1.3.3. Азотирование в жидких средах	48
1.4. Дефекты азотированной поверхности	52
1.4.1. Хрупкость и шелушение	52
1.4.2. Неравномерная и заниженная толщина азотированного слоя	54
1.4.3. Пониженная или пятнистая твердость слоя	55
1.5. Параметры контроля азотированного слоя	55
1.5.1. Контроль толщины азотированного слоя	55
1.5.2. Контроль твердости азотированного слоя	59
Вопросы к главе	60
Глава 2. Инженерия поверхности конструкционных материалов	62
2.1. Структура и механические свойства поверхностных слоев ..	63
2.1.1. Состояние поверхности и способы направленного изменения ее свойств	63
2.1.2. Характеристики структурного состояния пластически деформированного металла	79
2.2. Виды и характеристики разрушения поверхностей при контактном взаимодействии	89
2.2.1. Усталостное изнашивание	95
2.2.2. Изнашивание при трении в разных средах	99
2.2.3. Адгезия, схватывание и заедание поверхностей при трении. .	102
2.3. Задачи инженерии поверхности при формировании износостойкого структурного состояния металлических материалов	124
Вопросы к главе	130

Глава 3. Фундаментальные основы формирования структуры и свойств поверхностных слоев сталей при азотировании	132
3.1. Структура поверхностных слоев при азотировании сталей перлитного класса	132
3.1.1. Структура азотированного слоя конструкционных легированных сталей 38Х2МЮА и 40Х	132
3.1.2. Влияние режимов азотирования	140
3.1.3. Влияние предварительной термической обработки	152
3.1.4. Механизм формирования нитридов в азотированном слое	162
3.2. Азотирование сталей мартенситного класса	172
3.2.1. Влияние условий азотирования на структуру и свойства поверхностных слоев низкоуглеродистых сталей	173
3.2.2. Влияние размера зерна аустенита	186
3.2.3. Влияние предварительной пластической деформации	203
3.2.4. Структурное состояние зернограничных областей азотированного слоя	210
3.2.5. Влияние термической обработки	224
3.3. Общие закономерности формирования структуры при азотировании сталей перлитного и мартенситного классов	238
3.4. Особенности формирования структуры азотированных сталей аустенитного класса	250
3.4.1. Структура азотированного слоя	251
3.4.2. Механизм формирования структуры азотированного слоя аустенитных сталей	277
3.5. Роль легирующих элементов в процессе формирования структуры поверхностного азотированного слоя	291
3.5.1. Влияние хрома, алюминия и молибдена	292
3.5.2. Влияние никеля на структуру азотированного слоя	302
3.5.3. Влияние легирующих элементов на состав зернограничных областей	307
Вопросы к главе	311
Глава 4. Износостойкость азотированных сталей	312
4.1. Триботехнические характеристики азотированных сталей перлитного и мартенситного классов	313
4.1.1. Влияние предварительной термической обработки	313
4.1.2. Влияние режимов азотирования	326

4.1.3. Влияние легирующих элементов на износостойкость азотированных сталей	337
4.1.4. Износостойкость сталей, подвергнутых химико-термической обработке с активизацией процесса насыщения поверхности	351
4.1.5. Влияние механической обработки изделий из азотированной стали на ее износостойкость	358
4.2. Особенности изнашивания сталей аустенитного класса	361
Вопросы к главе	367
Глава 5. Контактная выносливость азотированных сталей	368
5.1. Контактная усталость азотированных сталей	370
5.2. Структурные характеристики качества азотированной поверхности с позиций триботехнического материаловедения	379
5.3. Влияние технологических факторов процесса азотирования на контактную долговечность стали	384
5.4. Сравнительная оценка контактной выносливости азотированных и цементованных сталей	393
Вопросы к главе	403
Глава 6. Выбор конструкционных материалов триботехнического назначения	404
6.1. Общие правила выбора	404
6.2. Совместимость материалов пар трения	407
6.3. Метод оценки триботехнической эффективности процесса азотирования сталей и сплавов	424
6.4. Результаты испытаний пар трения скольжения при возвратно-поступательном движении	437
Вопросы к главе	438
Глава 7. Методы триботехнических испытаний конструкционных материалов	439
7.1. Основные схемы испытаний	439
7.2. Критерии оценки результатов испытаний	439
7.3. Методы оценки износа	443
7.3.1. Метод поверхностной активации и радиоактивных марок	444
7.3.2. Метод активационного анализа смазочных материалов	445
7.3.3. Метод спектрального анализа смазочного масла	445
7.3.4. Метод вырезанных лунок	446

7.3.5. Устройство для непрерывного автоматического фиксирования суммарного износа испытываемых образцов (ГОСТ 23.216–84)	448
7.4. Методы оценки коэффициента трения	450
7.4.1. Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении	450
7.4.2. Метод определения коэффициента трения при ударе	452
7.4.3. Метод оценки коэффициента трения качения	454
7.4.4. Руководство для измерения и записи коэффициента трения (ASTM G-115–98)	455
7.5. Стандартизированные методы триботехнических испытаний материалов	457
7.5.1. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание (ГОСТ 23.207–79)	457
7.5.2. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208–79)	459
7.5.3. Мегаллы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367–71)	460
7.5.4. Пластмассы. Метод испытаний на абразивный износ (ГОСТ 11012–69)	462
7.5.5. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой (РД 50–339–82)	463
7.5.6. Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя (ГОСТ 23.201–78)	465
7.5.7. Метод испытаний материалов на изнашивание при ударе в условиях низких температур (ГОСТ 23.212–82)	467
7.5.8. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии (ГОСТ 23.211–80)	468
7.5.9. Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами (ГОСТ 23.219–84)	469
7.5.10. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении (ГОСТ 23.204–78)	470

7.5.11. Метод оценки противозадирных свойств машиностроительных материалов (ГОСТ 23.213–83)	472
7.5.12. Метод оценки фрикционной теплостойкости материалов (РД 50–662–88)	474
7.5.13. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладонными смесями (ГОСТ 23.216–84)	476
7.5.14. Метод оценки истирающей способности поверхности восстановленных валов (ГОСТ 23.220–84)	479
7.5.15. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей (ГОСТ 23.224–86)	480
7.5.16. Экспериментальная оценка прирабатываемости материалов (РД 50–662–88)	482
7.5.17. Метод определения триботехнических свойств конструкционных материалов при взаимодействии с волокнистой массой (ГОСТ 23.223–97)	484
7.5.18. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима (ГОСТ 23.205–79)	485
7.5.19. Материалы смазочные и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине (ГОСТ 9490–75)	485
7.5.20. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении (ГОСТ 23.221–84)	487
7.5.21. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок	488
7.6. Международные стандарты по методам триботехнических испытаний	490
7.6.1. Испытания на абразивный износ с помощью резинового колеса и сухого песка (ASTM G-65–83)	490
7.6.2. Метод испытаний на износ по схеме «влажный песок–резиновое колесо» (ASTM G-105–89)	491
7.6.3. Метод испытаний по закрепленному абразиву по схемам с «пальцем» (ASTM G-132–96)	491
7.6.4. Метод испытаний в абразивной суспензии (ASTM G-75–82)	492

7.6.5. Метод испытаний на абразивное изнашивание в струе твердых частиц воздушного потока (ASTM G-76-83)	493
7.6.6. Метод испытаний на абразивный износ при дроблении (ASTM G-81-83)	494
7.6.7. Испытания на кавитационное изнашивание при вибрациях (ASTM G-32-77)	494
7.6.8. Испытания на стойкость к гидроэрозионному и кавитационному изнашиванию при капельной эрозии (ASTM G-73-82)	495
7.6.9. Метод оценки износостойкости материалов по схеме «колодка-ролик» (ASTM G-77-98)	495
7.6.10. Метод испытаний на износ пластмасс по схеме «колодка-ролик» (ASTM G-137-97)	496
7.6.11. Метод испытаний на износ по схеме со скрещенными цилиндрами (ASTM G-83-96)	496
7.6.12. Метод испытаний на износ по схеме «палец-диск» (ASTM G-99-95a)	497
7.6.13. Метод испытаний при возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости (ASTM G-133-95)	498
7.7. Нестандартизированные методы триботехнических испытаний	498
7.7.1. Методы испытаний материалов при трении о свободный абразив	498
7.7.2. Методы испытаний на гидроабразивную износостойкость материалов	502
7.7.3. Метод испытаний на кавитационное изнашивание (КТИПП, Г.А. Прейс)	503
7.7.4. Методы триботехнических испытаний в вакууме	504
7.7.5. Метод испытаний при фрикционном разогреве посредством ступенчатого изменения частоты вращения образца	504
7.7.6. Метод испытаний при разогреве с помощью нагревателя	505
7.7.7. Метод испытаний конструкционных материалов для пар трения технологического оборудования (ИМАШ РАН)	505
7.7.8. Метод испытаний сопряжения «торец поршневого кольца-канавка поршня» (ИМАШ РАН)	507

7.7.9. Метод испытаний сопряжения «вкладыш подшипника-шейка коленчатого вала» (ИМАШ РАН)	508
7.7.10. Метод испытаний защитных покрытий на автоматизированной машине трения Tribometer фирмы CSM Instruments	510
Вопросы к главе	511
Заключение	512
Литература	516
Приложение 1	532
Приложение 2	536

Учебное издание

Герасимов Сергей Алексеевич
Куксенова Лидия Ивановна
Лаптева Валерия Григорьевна
Оспенникова Ольга Геннадиевна
Алексеева Мария Сергеевна
Громов Валерий Игоревич

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ
И ЭСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
АЗОТИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Ответственная за выпуск – Е.А. Ватулян
Выпускающий редактор – О.В. Федина
Редакторы – Т.Н. Юдина, Е.А. Аграфенина
Корректор – И.С. Туманова
Компьютерный набор – М.В. Савина
Подготовка иллюстраций – М.С. Закржевская
Дизайн обложки – Е.А. Цилин
Верстка – ООО «ЭйПиСиПублишинг»

ФГУП «ВИАМ», 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Тел.: +7 (499) 261-86-77
Факс: +7 (499) 267-86-09
Электронная почта: admin@viam.ru
Сайт: www.viam.ru

Отпечатано в ООО «ЭйПиСиПублишинг»
127550, г. Москва, ул. Онежская, д. 24, оф. 7

Подписано в печать 25.07.2019
Формат 60×84/16
Объем 34,88 усл. п. л. Тираж 750 экз.

ISBN 978-5-905217-47-0



9 785905 217470