

М. А. Скотникова

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ

М. А. Скотникова

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

УДК 621
ББК 34.4
С44

Рецензенты:

д. т. н., профессор факультета систем управления и робототехники
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский
университет информационных технологий, механики и оптики»

Мусалимов Виктор Михайлович;

д. т. н., заведующая лабораторией ФГБУН
«Институт проблем машиноведения Российской академии наук»

Седакова Елена Борисовна

Скотникова, М. А.

С44 Физические основы технологических процессов в машиностроении :
учебное пособие / М. А. Скотникова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инжене-
рия, 2023. – 188 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-1049-6

Изложены научно обоснованные технологические разработки, заключаю-
щиеся в изучении физических основ новых высокоэффективных технологиче-
ских процессов изготовления изделий, обеспечивающих повышение качества
и надежности их работы, увеличение срока их службы за счет учёта структурных
и фазовых превращений, как в материале заготовки изделия на этапе его механи-
ческой обработки, так и в материале готового изделия на этапе его эксплуатации.

Для студентов машиностроительных специальностей.

УДК 621
ББК 34.4

ISBN 978-5-9729-1049-6 © Скотникова М. А., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Современная классификация структурных уровней исследования.....	10
1.2. Современные методы исследования.....	12
1.2.1. Растровая электронная микроскопия.....	14
1.2.2. Просвечивающая электронная микроскопия.....	17
1.2.3. Рентгеноструктурный анализ.....	21
1.2.4. Термический анализ.....	24
1.2.5. Дилатометрический анализ.....	30
1.2.6. Физические методы контроля качества металлов.....	32
1.3. Идеальная кристаллическая структура металлических материалов.....	40
1.4. Реальная кристаллическая структура металлических материалов. Дефекты кристаллического строения.....	49
1.4.1. Точечные дефекты кристаллического строения.....	49
1.4.2. Линейные дефекты кристаллического строения.....	51
1.4.3. Поверхностные дефекты кристаллического строения.....	55
1.4.4. Объемные дефекты кристаллического строения.....	56
2. ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	57
2.1. Внутренние напряжения временные и остаточные. Физическая природа.....	57
2.2. Теоретическая прочность металлических материалов.....	58
2.3. Реальная прочность металлических материалов как совокупная характеристика способов упрочнения с учётом влияния структурных уровней.....	60
2.3.1. Упрочнение, обусловленное силой трения решетки в монокристалле.....	63
2.3.2. Упрочнение, обусловленное твердорастворным механизмом в монокристалле сплава.....	64

2.3.3. Дисперсионное упрочнение в монокристалле.....	66
2.3.4. Зернограничное упрочнение в поликристалле	67
2.3.5. Дислокационное упрочнение в поликристаллах	69
2.3.6. Субструктурное упрочнение в поликристалле.....	70
3. ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	72
3.1. Классификация видов деформации металлических материалов	72
3.2. Механизмы пластической деформации металлических материалов. Энергия дефекта упаковки материала как критерий выбора механизма пластической деформации	73
3.2.1. Сдвиговой механизм пластической деформации «скольжением»	75
3.2.2. Сдвиговой механизм пластической деформации «двойникованием»	77
3.2.3. Сдвиговой механизм пластической деформации «фазовым превращением».....	80
3.2.4. Ротационный механизм пластической деформации	81
3.3. Закономерности структурных превращений в материалах с увеличением степени их пластического деформирования	83
3.4. Критическая степень пластической деформации. Механизмы зарождения трещин в металлических материалах	87
3.4.1. Механизмы зарождения микротрещин	88
3.5. Критический размер зародышевой трещины. Механизмы распространения трещин и классификация видов разрушения металлических материалов.....	91
3.5.1. Критический размер зародышевой трещины.....	91
3.5.2. Механизмы распространения микротрещин и классификация видов разрушения металлических материалов.....	93
3.6. Способы оценки работы зарождения и распространения трещин в материале изделий по испытаниям на растяжение и ударный изгиб	98
3.6.1. Оценка работы зарождения и распространения трещин в материале изделий по испытаниям на растяжение	98
3.6.2. Оценка работы зарождения и распространения трещин в материале изделий по испытаниям на ударный изгиб.....	104
3.6.3. Модели вязко-хрупкого перехода. Хладноломкость. Оценка неполадок технологического процесса по виду излома	105
3.7. Влияние вида напряжённого состояния на свойства металлических материалов	108

4. ФОРМИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ	111
4.1. Классификация остаточных напряжений	112
4.2. Факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений.....	115
4.2.1. <i>Механический фактор. Формирование и контроль остаточных напряжений в деталях машин, возникающих под действием механической обработки</i>	115
4.2.2. <i>Тепловой фактор. Термические напряжения, возникающие в сечении заготовок из неполиморфных материалов в результате резкого снижения температуры из высокотемпературной области</i>	117
4.2.3. <i>Термические напряжения, возникающие по сечению сварного соединения.....</i>	118
4.2.4. <i>Термические напряжения, возникающие вдоль границ зерен в результате анизотропии теплового расширения в металлах с ГПУ-решеткой.....</i>	120
4.2.5. <i>Остаточные напряжения, возникающие под действием структурно-фазовых превращений. Фазовый наклеп. Мартенситные превращения. Распад пересыщенных твердых растворов по механизму старения.....</i>	124
4.2.6. <i>Коррозионные напряжения.....</i>	128
4.3. Микрофракционные методы контроля остаточных напряжений	130
4.3.1. <i>Качественный контроль напряжений в металле с помощью методов растровой электронной микроскопии</i>	131
4.3.2. <i>Контроль микронапряжений в металле с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии.....</i>	132
4.3.3. <i>Количественный контроль напряжений с помощью рентгеновского метода $\sin^2 \psi$.....</i>	133
5. СТРУКТУРНАЯ И КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ МАШИН	137
5.1. Модель фазовых превращений в вакансионно-пересыщенных ОЦК – твердых растворах титановых сплавов	140
5.2. Кинетическая диаграмма структурных и фазовых превращений в сплавах титана в зависимости от температуры нагрева.....	142
5.2.1. <i>Обсуждение</i>	150
6. ФИЗИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	152

6.1. Закономерности фазовых превращений в машиностроительных материалах с увеличением скорости их деформирования.....	152
6.2. Закономерности структурных и фазовых превращений в сплавах титана при ударном нагружении со скоростью 400...600 м/с	156
6.2.1. Методика и материалы	156
6.2.2. Исследование морфологии разрушения металла заготовок после ударного нагружения	157
6.2.3. Микротвердость металла заготовки после ударного нагружения	160
6.2.4. Структура металла заготовки после ударного нагружения.....	161
6.2.5. Заключение.....	162
6.3. Закономерности структурных и фазовых превращений в машиностроительных материалах при высокоскоростной лезвийной обработке.....	163
6.3.1. Методика и материалы	164
6.3.2. Оценка износа материала инструмента	165
6.3.3. Структура металла стружки из сплава АМц	169
6.3.4. Структура металла стружки из сплава ВТ23	170
6.3.5. Структура металла стружки из сплава ХВГ.....	171
6.3.6. Оценка микротвердости материала стружки	175
6.3.7. Заключение.....	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	180
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	183