

А.П. АМОСОВ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕНИЯ
ИНЕРТНЫХ И ВЗРЫВЧАТЫХ
МАТЕРИАЛОВ

Москва
Машиностроение
2011

УДК 531.43+532.516+536.4+539.375.6+621.01.001+662.215.5

ББК 34.41+35.63+24.54+30н

А62

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *С.Е. Малинин*

д-р техн. наук, проф. *Б.М. Силаев*

Амосов А.П.

А62 Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. – М.: Машиностроение, 2011. – 363 с., ил.

ISBN 978-5-94275-588-1

Предлагаемая книга является монографией, в которой представлен цикл теоретических исследований автора по математическому моделированию процесса разогрева различных материалов при внешнем трении.

В первых шести главах представлены результаты исследований теплофизики трения инертных материалов. Построены модели разогрева твердых тел: при сухом кратковременном трении для сплошного и дискретного фрикционного контакта, при наличии износа; при сухом длительном трении для поступательного и вращательного движений; при образовании и развитии пластической и жидкой прослоек за счет фрикционного тепловыделения; при наличии прослойки сдвига на фрикционном контакте. Разработана тепловая теория автоколебаний при сухом трении и трении со смазкой. Исследован фрикционный разогрев пластичных материалов за счет внешнего контактного трения об ограничивающие твердые тела при свободном раздавливании ударом, при ударном выдавливании в фильере, при быстром внедрении клиновидного пуансона.

Разработанные для инертных материалов теплофизические модели использованы в последней, седьмой главе для расчета возможности и характеристик теплового воспламенения взрывчатых материалов за счет фрикционного разогрева.

Содержание книги может быть использовано при постановке модельных экспериментов, при математическом моделировании сложных неизотермических и нестационарных процессов трения и износа, при компьютерном проектировании тормозных и фрикционных устройств и передаточных механизмов, при исследовании чувствительности и обеспечении безопасности взрывчатых материалов.

Для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов вузов.

УДК 531.43+532.516+536.4+539.375.6+621.01.001+662.215.5

ISBN 978-5-94275-588-1

© Амосов А.П., 2011

© Самарский государственный
технический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕПЛОФИЗИКУ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ	6
1.1. Фрикционный контакт твердых тел	6
1.2. Основные расчетные модели тепловой динамики трения	9
1.3. Сила трения и ее зависимость от температуры	12
1.4. Новые теплофизические модели трения	17
Глава 2. МОДЕЛИ РАЗОГРЕВА ТВЕРДЫХ ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СУХОМ КРАТКОВРЕМЕННОМ ТРЕНИИ	19
2.1. Модель разогрева при сплошном фрикционном контакте	20
2.1.1. Постановка задачи.....	20
2.1.2. Общее решение задачи	21
2.1.3. Решение при постоянной мощности тепловыделения трения.....	24
2.1.4. Решение при линейно убывающей силе трения.....	24
2.1.5. Анализ решения для средней поверхностной температуры	26
2.1.6. О фрикционном разогреве твердых ВВ в условиях копровых испытаний.....	29
2.2. Модель разогрева при дискретном фрикционном контакте	31
2.2.1. Задача о фрикционном разогреве на пятне контакта химически инертных тел	32
2.2.2. Разогрев неподвижным поверхностным источником тепла	32
2.2.3. Разогрев движущимся поверхностным источником тепла	33
2.2.4. Контактный разогрев тел.....	36
2.2.5. Контактный разогрев при учете зависимости силы трения от температуры.....	38
2.3. Модели разогрева при сухом трении с износом	50
2.3.1. Постановка задачи.....	50
2.3.2. Разогрев трущихся тел	51
2.3.3. Модель с равномерно нагретым слоем износа	52
2.3.4. Модель с поверхностным тепловыделением на границе слоя износа	56
2.3.5. Модель с объемным тепловыделением в слое износа	57
2.3.6. Учет зависимости силы трения от температуры.....	61
2.3.7. Некоторые оценки	62
Глава 3. МОДЕЛИ РАЗОГРЕВА ТВЕРДЫХ ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СУХОМ ДЛИТЕЛЬНОМ ТРЕНИИ	63
3.1. Стационарный нагрев инертного прямого цилиндра торцевым тепловым потоком	64
3.2. Разогрев твердых тел за счет длительного трения при поступательном движении	69
3.3. Разогрев твердых тел при длительном трении вращения	74
Глава 4. МОДЕЛИ РАЗОГРЕВА ТВЕРДЫХ ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОСЛОЕК СДВИГА В ЗОНЕ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА	76
4.1. Образование пластической и жидкой прослоек при фрикционном разогреве твердых тел.....	80
4.1.1. Постановка задачи.....	80

4.1.2. Стадия сухого трения	80
4.1.3. Стадия возникновения и развития пластической прослойки.....	82
4.1.4. Стадия образования жидкой прослойки и совместного течения ее с пластической прослойкой.....	87
4.1.5. Стадия течения только жидкой прослойки.....	90
4.1.6. Условия возникновения жидкой фазы.....	93
4.1.7. Примеры конкретных расчетов	95
4.1.8. Граница фрикционного разогрева.....	100
4.1.9. О фрикционном аналоге критерия Био.....	102
4.2. Фрикционный разогрев твердых тел при наличии прослойки сдвига	104
4.2.1. Постановка задачи	104
4.2.2. Решение задачи	105
4.2.3. Сравнение эффективности разогрева двух одинаковых тел при внутреннем и внешнем высокоскоростном трении	110
Глава 5. МОДЕЛИ ФРИКЦИОННОГО РАЗОГРЕВА ДЛЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ.....	112
5.1. Тепловая теория автоколебаний при сухом трении	115
5.1.1. Постановка задачи	115
5.1.2. Предварительный анализ задачи.....	118
5.1.2.1. <i>Переход к безразмерному виду</i>	118
5.1.2.2. <i>Релаксационные и квазигармонические автоколебания</i>	119
5.1.2.3. <i>Переход к безразмерному виду в случае релаксационных колебаний</i>	120
5.1.2.4. <i>Приближенная оценка условий возникновения релаксационных колебаний</i>	122
5.1.3. Решение задачи	124
5.1.3.1. <i>Релаксационные колебания при линейной зависимости силы трения от температуры</i>	124
5.1.3.2. <i>Релаксационные колебания при нелинейной зависимости силы трения от температуры</i>	129
5.1.4. Автоколебания при больших скоростях трения.....	136
5.1.5. Автоколебания при малых коэффициентах взаимного перекрытия	138
5.1.6. Автоколебания при дискретном фрикционном контакте.....	139
5.1.7. Некоторые оценки	141
5.2. Тепловая теория автоколебаний при трении со смазкой.....	144
5.2.1. Постановка задачи	144
5.2.2. Решение задачи	146
5.2.3. Анализ решения	149
5.2.3.1. <i>Зависимость реологических характеристик от температуры</i>	149
5.2.3.2. <i>Влияние различных факторов на возможность возникновения автоколебаний</i>	150
5.2.3.3. <i>Квазигармонические и релаксационные автоколебания</i>	153
5.2.3.4. <i>Коэффициент теплоотдачи</i>	154
5.2.4. Некоторые оценки условий возникновения автоколебаний	156
5.2.5. Разогрев вязкой смазки при установившихся фрикционных автоколебаниях	157
5.2.5.1. <i>Метод элементарного энергетического баланса</i>	158

5.2.5.2. Амплитуда и разогрев при малых δ	160
5.2.5.3. Амплитуда и разогрев при больших δ	163
Глава 6. МОДЕЛИ РАЗОГРЕВА ПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	170
6.1. Разогрев тонкого пластического слоя при свободном раздавливании ударом	172
6.1.1. Постановка задачи	172
6.1.2. Метод оценки контактного разогрева сверху и снизу	175
6.1.3. Решение задачи	176
6.1.3.1. Переход к безразмерному виду	177
6.1.3.2. Результаты численных расчетов	179
6.1.3.3. Проверка приближенной теории «квазихолостого» удара	183
6.1.4. Учет некоторых факторов	187
6.2. Деформация и разогрев тонкого вязкопластического слоя при выдавливании в фильтре ударом	189
6.2.1. Постановка задачи	189
6.2.2. Поле скоростей	190
6.2.3. Поле напряжений	194
6.2.4. Среднее давление	198
6.2.5. Пластический и вязкий разогрев слоя	199
6.2.6. Контактный разогрев слоя	203
6.2.7. Деформация и разогрев слоя при ударе	205
6.2.8. Результаты численных расчетов	208
6.3. Разогрев пластических материалов при внедрении клиновидного пуансона	217
6.3.1. Механика внедрения пуансона	217
6.3.2. Теплофизика внедрения пуансона	228
6.3.2.1. Пластический разогрев	229
6.3.2.2. Контактный разогрев	231
Глава 7. МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ ФРИКЦИОННОГО РАЗОГРЕВА	235
7.1. Тепловое воспламенение	236
7.2. Поверхностное воспламенение (зажигание)	238
7.3. Объемное самовоспламенение (тепловой взрыв)	242
7.4. Несимметричное воспламенение при заданном тепловом потоке	246
7.4.1. Случай отсутствия бокового теплоотвода	248
7.4.2. Случай сильного бокового теплоотвода	251
7.4.3. Влияние выгорания	252
7.5. Очаговое воспламенение	254
7.6. О выходе горения за пределы очага воспламенения	257
7.6.1. Условия распространения горения за пределы очага воспламенения	258
7.6.2. О связи чувствительности ВВ со скоростью горения и о роли давления	262
7.7. Зажигание твердых ВВ теплотой кратковременного сухого трения при сплошном фрикционном контакте	270
7.7.1. Решение задач о зажигании	270
7.7.2. Учет стадии выхода на режим горения	271

7.7.3. Анализ решения	272
7.7.3.1. Критические условия воспламенения.....	272
7.7.3.2. Влияние температурной зависимости силы трения.....	275
7.7.3.3. Влияние теплофизических характеристик.....	277
7.7.4. Фрикционный разогрев ВВ в условиях копровых испытаний.....	278
7.7.4.1. Условия копровых испытаний	278
7.7.4.2. Параметры фрикционного разогрева.....	280
7.7.4.3. Сопоставление с экспериментом	283
7.8. Воспламенение твердых ВВ при дискретном фрикционном контакте.....	285
7.8.1. Постановка задачи	285
7.8.2. Результаты решения	288
7.8.3. Некоторые оценки	290
7.8.3.1. Пара трения «сталь – гексоген»	290
7.8.3.2. Разогрев на частицах алюминия.....	293
7.8.3.3. Разогрев на частицах песка	296
7.9. Воспламенение твердых ВВ при трении с износом.....	298
7.10. Воспламенение при сухом длительном трении.....	302
7.11. Воспламенение твердых ВВ при фрикционном разогреве с образованием пластической и жидкой прослоек	303
7.12. О воспламенении твердых ВВ за счет фрикционного разогрева при наличии прослойки сдвига	309
7.13. Релаксационный механизм разогрева и воспламенения твердых ВВ при механических воздействиях	310
7.13.1. Определение релаксационного механизма	310
7.13.2. Постановка задачи	312
7.13.3. Приведение задачи к безразмерному виду.....	315
7.13.4. Решение задачи	318
7.13.5. Несимметричная задача	325
7.13.6. Релаксационный механизм в других условиях.....	326
7.13.6.1. Другие виды деформации	326
7.13.6.2. Высокоскоростное трение	327
7.13.6.3. Малые коэффициенты взаимного перекрытия.....	328
7.13.6.4. Дискретный фрикционный контакт.....	329
7.13.7. Возможность инициирования твердых ВВ по релаксационному механизму в условиях копровых испытаний	329
7.14. Воспламенение жидких ВВ при автоколебаниях.....	332
7.15. Воспламенение тонкого пластического слоя ВВ при свободном раздавливании ударом.....	334
7.16. Воспламенение пластических ВВ при внедрении клиновидного пуансона.....	336
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	339
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	350