

УДК 621.37
ББК 32.847
К 615

Авторы:

В. И. Колпаков, А. Л. Галиновский, Л. В. Судник, А. А. Илюхина

Рецензенты:

доктор технических наук Е. Ф. Грязнов
доктор физико-математических наук А. И. Малкин
доктор технических наук И. А. Семенов

**К 615 Импульсные технологии : учебник / В. И. Колпаков [и др.]. —
Старый Оскол : ТНТ, 2022. — 432 с. : ил.**

ISBN 978-5-94178-745-6

В учебном издании обобщен опыт использования импульсных методов обработки материалов с использованием мощных источников энергии (взрывчатых веществ, порохов, газовых смесей, электрических разрядов, высокоскоростных гидро- и гидроабразивных потоков жидкостей и других энергоносителей). Изложены сущность, преимущества и области применения импульсных процессов упрочнения металлов, прессования антифрикционных материалов, взрывной резки, сварки и штамповки, гидродинамического прессования, магнитно-импульсной, гидро- и гидроабразивной обработки, детонационного напыления. Рассмотрены вопросы технологии и расчета основных параметров процессов, описаны конструкции применяемой оснастки.

Учебник предназначен для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки специалитета «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов», УГСН «Авиационная и ракетно-космическая техника». Может быть полезным аспирантам, инженерно-техническим и научным работникам машиностроительных направлений технических вузов.

**УДК 621.37
ББК 32.847**

ISBN 978-5-94178-745-6

© Колпаков В. И., Галиновский А. Л.,
Судник Л. В., Илюхина А. А., 2022
© Оформление. ООО «ТНТ», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Перечень условных обозначений	11
Введение	13
ГЛАВА 1. ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА В ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ 17	
1.1. Общая характеристика явлений взрыва	17
1.2. Взрывчатые материалы. Основные характеристики и определяющие соотношения.....	19
1.2.1. Метательные взрывчатые вещества (пороха).....	20
1.2.2. Газовые смеси	25
1.2.3. Реакционные материалы (пиротехнические составы) ..	30
1.2.4. Бризантные взрывчатые вещества.....	32
1.3. Классификация взрывчатых материалов	45
Контрольные вопросы	47
Библиографический список к главе 1	48
ГЛАВА 2. ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ И УДАРНОВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ 51	
2.1. Классификация режимов нагружения.....	51
2.2. Динамическое нагружение	54
2.3. Ударноволновое нагружение	58
2.4. Схемы используемых для упрочнения взрывных устройств	66
2.5. Использование импульсных методов обработки металлов для создания материалов с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами	68
2.6. Исследование физико-механических свойств и металлографии экспериментальных образцов композиционного материала с оптимизацией режимов термического упрочнения.....	88

2.7. Ударноволновая обработка металлофторопластовых композиций	104
Контрольные вопросы	130
Библиографический список к главе 2	132
 ГЛАВА 3. ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОНСОЛИДАЦИИ И ДИСТРУКЦИИ МАТЕРИАЛОВ 134	
3.1. Сварка металлов взрывом	135
3.2. Специфика ударных взаимодействий	141
3.3. Применение импульсных методов сварки и обработки.....	150
3.4. Разработка технологических режимов импульсного прессования экспериментальных образцов.....	152
3.5. Пробивка отверстий и резка при взрывном нагружении	164
3.5.1. Применение кумулятивных зарядов для разделения конструкций	166
3.5.2. Взрывные устройства для подводного резания свай ..	181
3.6. Технологические особенности оконцевания и соединения токоведущих жил кабелей и проводов	184
Контрольные вопросы	189
Библиографический список к главе 3	190
 ГЛАВА 4. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА И ПРЕССОВАНИЕ 193	
4.1. Основные положения и схемы штамповки взрывом	193
4.2. Штамповка взрывом в различных средах	211
4.2.1. Действие подводного взрыва на заготовку	211
4.2.2. Гидровзрывная штамповка с нагревом.....	215
4.2.3. Штамповка взрывом в песке.....	216
4.3. Параметры процесса штамповки взрывом.....	219
4.4. Штамповка деталей с помощью пороховых и газовых смесей.....	221
4.5. Оснастка для гидровзрывной штамповки.....	224
4.6. Высоковольтный электрический разряд в жидкости	229
4.6.1. Листовая электрогидравлическая штамповка	232
4.6.2. Оценочные расчеты электрогидравлической штамповки	237
4.7. Гидродинамическое прессование	239
Контрольные вопросы	246
Библиографический список к главе 4	247

ГЛАВА 5. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ	249
5.1. Взаимодействие импульсного магнитного поля с деформируемой заготовкой	250
5.2. Основные особенности МИОМ	259
5.3. Схемы магнитно-импульсного прессования.....	262
5.4. Штамповка через передающую среду	268
5.5. Инструмент для магнитно-импульсной обработки.....	277
Контрольные вопросы	280
Библиографический список к главе 5	281
ГЛАВА 6. ГИДРО- И ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	282
6.1. Сущность процесса ультраструктурной обработки	284
6.2. Технико-экономическое обоснование эффективности резания с использованием высокоскоростной струи жидкости	289
6.3. Области применения ультраструктурной обработки.....	304
6.3.1. Обработка лопаток газотурбинных двигателей.....	304
6.3.2. Раскрой и резание листов, прошивка отверстий материала	307
6.3.3. Примеры диагностического применения ультраструи	309
6.3.4. Получение образцов для испытаний с помощью гидротехнологий	313
6.4. Производительность процесса гидроабразивной обработки	318
6.5. Устройство станков ультраструктурной обработки	323
6.5.1. Установки гидроабразивной резки	323
6.5.2. Насосы высокого давления.....	325
6.5.3. Дополнительные устройства.....	328
6.5.4. Программное обеспечение для гидроабразивной резки	329
6.5.5. Производители	332
6.6. Сравнение технологий резки заготовок из разных материалов	339
Контрольные вопросы	341
Библиографический список к главе 6	342

ГЛАВА 7. ДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ.....	346
7.1. Детонационно-газовое напыление покрытий	348
7.2. Установки для детонационно-газового напыления	358
7.3. Материалы для детонационных покрытий	363
7.4. Нанесение покрытий продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ.....	365
Контрольные вопросы	367
Библиографический список к главе 7	368
ГЛАВА 8. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	370
8.1. Уравнения адиабатического движения сжимаемой вязкоупругопластической и упругопластической сред.....	370
8.2. Уравнения состояния твердого тела и продуктов детонации	375
8.3. Динамика высокоскоростной деформации при сварке металлов взрывом.....	380
8.4. Численное моделирование процесса взрывного компактирования медных цилиндрических заготовок.....	387
8.5. Установление закономерностей формирования гидроабразивной струи в условиях работы под водой.....	401
8.6. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи	417
Контрольные вопросы	425
Библиографический список к главе 8	426
Заключение	431

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге обобщен опыт использования современных импульсных методов обработки материалов с использованием мощных источников энергии (взрывчатых веществ, порохов, газовых смесей, электрических разрядов, высокоскоростных гидро- и гидроабразивных потоков жидкостей и других энергоносителей). По нашему мнению, такой учебник необходим для расширения профессиональных возможностей выпускников технических вузов и университетов, получающих или получивших образование по специальности «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» / «Производство и технологическая отработка изделий ракетно-космической техники», а также для подготовки студентов, бакалавров и магистров по направлению «Авиа- и ракетостроение» и ряду оборонных специальностей. Материалы, изложенные в учебнике, могут быть полезны также для широкого круга специалистов, работающих в смежных отраслях и в силу служебной необходимости интересующихся описанными технологиями.

Написанию настоящего издания предшествовал многолетний опыт отработки конкретных технологий, связанных с использованием различных источников энергии при производстве летательных аппаратов, и опыт преподавания различных дисциплин, объединенных под общим названием «Импульсные технологии» на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения». При написании книги использовались труды ведущих российских и белорусских научно-исследовательских организаций, а также опыт дальнего зарубежья.

Представленный материал учебника состоит из введения и восьми глав. Глава 1 посвящена описанию импульсных источников высоких энергий, к которым относятся взрывчатые вещества, пороха, газовые смеси и реакционные материалы. Уделено необходимое внимание процессам возбуждения и распространения детонации в зарядах взрывчатых веществ и газовых смесях, широко применяемых в промышленной реализации взрывных технологий. Здесь же приведены необходимые зависимости для определения параметров нагружения материалов данными источниками энергий.

Для прогнозирования поведения материалов при импульсном нагружении требуются данные об их механической прочности в широком диапазоне значений основных параметров, характеризующих условия нагружения. С этой целью в главе 2 представлены необходимые сведения о динамической прочности материалов. Здесь же описаны технологии упрочнения металлов взрывом и взрывные устройства, применяемые для этих технологий. Представлены примеры конкретных технологий, реализуемых в настоящее время.

В главе 3 описаны различные схемы и методы расчета параметров сварки взрывом, закономерности процесса сварки и элементы инженерной методики проектирования взрывных устройств для сварки взрывом. Описаны технологии сварки взрывом, импульсного прессования порошковых композиций, прошивки отверстий, взрывной резки, оконцевания и соединения токоведущих жил кабелей и проводов. Подробно описаны взрывные технологии, связанные с применением линейных и осесимметричных кумулятивных зарядов, даны рекомендации по выбору их конструктивных характеристик. Представлены примеры реализации описанных технологий, используемых в настоящее время.

В главе 4 даны основные понятия штамповки взрывом и содержится подробное описание расчетных зависимостей для определения основных параметров данной технологии.

Здесь же представлены примеры операций штамповки деталей с помощью пороховых и газовых смесей, а также листовой электрогидравлической штамповки. Описана инженерная методика расчета параметров электрогидравлической штамповки.

Глава 5 посвящена магнитно-импульсной обработке металлов, широко используемой в ракетостроении. Рассмотрено взаимодействие импульсного магнитного поля с деформируемой заготовкой, представлены основные схемы магнитно-импульсного прессования и технологии штамповки через передающую среду. Описан инструмент, используемый в операциях магнитно-импульсной обработки.

Глава 6 посвящена гидро- и гидроабразивной обработке материалов. Изложена сущность процесса ультраструктурной обработки, представлено технико-экономическое обоснование эффективности резания с использованием высокоскоростной струи жидкости, описаны области применения ультраструктурной обработки и установки гидроабразивной резки.

В главе 7 рассмотрены методы детонационно-газового и взрывного методов напыления упрочняющих покрытий.

Наконец, в главе 8 изложен современный подход к математическому моделированию динамических технологических операций. Рассмотрены примеры численного моделирования процессов взрывной сварки металлов, взрывного компактирования цилиндрических заготовок, формирования гидроабразивной струи в условиях работы под водой и разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи.

Каждая глава содержит вопросы для самоконтроля и библиографический список, раскрывающий подробности излагаемого аспекта.

Кроме того, отметим, что так как одной из целей настоящего издания является использование его материалов при курсовом и дипломном проектировании, то в нем приведены