

Г.И. Канель

**УДАРНЫЕ  
ВОЛНЫ  
В ФИЗИКЕ  
ТВЕРДОГО ТЕЛА**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2018

УДК 541.12  
ББК 30.13  
К 19



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 18-12-00017,  
не подлежит продаже*

Канель Г.И. **Ударные волны в физике твердого тела.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 208 с. — ISBN 978-5-9221-1810-1.

Представлены методы и последние наиболее интересные результаты экспериментальных исследований прочностных свойств, полиморфизма и метастабильных состояний материалов и веществ при чрезвычайно малых длительностях ударно-волнового воздействия. Обнаружено явление аномального возрастания напряжения пластического течения с увеличением температуры при высоких скоростях деформации. Реализовано приближение к предельно возможной (идеальной) объемной и сдвиговой прочности твердых тел. Получены новые данные о механизме и основных закономерностях субмикросекундных полиморфных превращений и фазовых переходов. Представлен анализ особенностей поведения высокотвердых хрупких материалов при ударно-волновом нагружении и возможных способов диагностирования разрушения сжатием. Обнаружены и исследованы волны разрушения в ударно-сжатых стеклах. Обнаружен ряд специфических особенностей динамики упругопластических волн ударного сжатия в релаксирующих средах, которые еще ждут осмысления и теоретического описания. Изложению основных результатов предшествует подробное описание теоретических основ метода и краткое обсуждение основных способов генерации и диагностики ударных волн в твердых телах.

Книга написана по результатам многолетних исследований при поддержке главным образом Российского фонда фундаментальных исследований, а также программ фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук и Российского научного фонда и ориентирована на специалистов в области физики высоких динамических давлений, физики металлов, физики и механики прочности и пластичности.



ISBN 978-5-9221-1810-1

© ФИЗМАТЛИТ, 2018

© Г. И. Канель, 2018

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	6
<b>Глава 1. Одномерные движения сжимаемой среды . . . . .</b>	<b>9</b>
§ 1.1. Одномерные безразрывные течения сжимаемой среды . . . . .	10
§ 1.2. Характеристики, интегралы Римана . . . . .	12
§ 1.3. Ударные волны . . . . .	16
§ 1.4. Устойчивость ударных волн, многоволновые конфигурации и ударные волны разрежения в среде с аномальной сжимаемостью . . . . .	22
§ 1.5. Распады разрывов и волновые взаимодействия . . . . .	24
§ 1.6. Детонационная волна . . . . .	26
<b>Глава 2. Методы генерации ударных волн и регистрации газодинамических параметров в динамических экспериментах . . . . .</b>	<b>29</b>
§ 2.1. Взрывные генераторы плоских ударных волн . . . . .	29
§ 2.2. Баллистические установки для экспериментов с ударными волнами . . . . .	34
§ 2.3. Перспективные генераторы высоких динамических давлений . . . . .	37
§ 2.4. Дискретные методы измерения волновых и массовых скоростей . . . . .	40
§ 2.5. Методы непрерывной регистрации профилей массовой скорости . . . . .	43
§ 2.5.1. Емкостные датчики скорости . . . . .	44
§ 2.5.2. Лазерные измерители скорости движения свободных и контактных поверхностей образцов . . . . .	46
§ 2.5.3. Манганиновые пьезорезисторы для регистрации профилей давления ударного сжатия . . . . .	51
<b>Глава 3. Основные направления исследований поведения конденсированных веществ при ударном сжатии методами механики сплошных сред . . . . .</b>	<b>56</b>
§ 3.1. Структура волн сжатия и разрежения в упругопластическом теле . . . . .	56
§ 3.2. Волна сжатия в упрочняющемся и разупрочняющемся материалах . . . . .	59
§ 3.3. Эволюция упругого предвестника в релаксирующем материале . . . . .	62
§ 3.4. Интерпретация профилей скорости свободной поверхности при выходе упругопластической волны сжатия . . . . .	65
§ 3.5. Структура пластической ударной волны . . . . .	69
§ 3.6. Формирование двухволновой структуры при полиморфном превращении в процессе ударного сжатия . . . . .	70

§ 3.7. Откольное разрушение твердых тел. Волновые взаимодействия при отколе . . . . .	72
§ 3.8. Определение величины разрушающего напряжения при отколе. Искажение волновых профилей при отколе в упруго-пластическом теле. . . . .	74
<b>Глава 4. Основные результаты исследований откольных явлений в различных материалах. . . . .</b>	<b>82</b>
§ 4.1. Характерные значения субмикросекундной прочности твердых тел и жидкостей . . . . .	82
§ 4.1.1. Условия нагружения при измерениях откольной прочности материалов . . . . .	82
§ 4.1.2. Откольная прочность материалов и веществ различных классов . . . . .	87
§ 4.2. Приближение к «идеальной» прочности конденсированного вещества. . . . .	92
§ 4.3. Влияние структурных факторов на субмикросекундную прочность металлов . . . . .	95
§ 4.4. Откольная прочность монокристаллов и поликристаллов вблизи плавления. . . . .	102
<b>Глава 5. Специфические особенности высокоскоростной деформации металлов при ударном сжатии. . . . .</b>	<b>105</b>
§ 5.1. Общие представления . . . . .	105
§ 5.2. Методология ударно-волновых исследований скоростных зависимостей сопротивления деформированию . . . . .	109
§ 5.3. Температурные эффекты . . . . .	114
§ 5.4. Приближение к предельной (идеальной) сдвиговой прочности . . . . .	116
§ 5.5. Эффекты отжига и упрочняющей механической обработки . . . . .	120
§ 5.6. Температурно-скоростные зависимости напряжения течения на разных стадиях ударно-волнового деформирования металлов. . . . .	124
§ 5.7. Поведение монокристаллов при ударно-волновом нагружении . . . . .	128
§ 5.8. Эффекты размножения дислокаций. . . . .	134
<b>Глава 6. Ударно-волновое сжатие высокотвердых хрупких материалов. . . . .</b>	<b>140</b>
§ 6.1. Ударное сжатие и разрушение стекла. Волны разрушения. . . . .	142
§ 6.2. Попытка регистрации волн разрушения при ударном сжатии керамических материалов . . . . .	148
§ 6.3. Диагностирование характера неупругого деформирования хрупких материалов при ударном сжатии. . . . .	150
§ 6.4. Дивергентное ударное сжатие . . . . .	154
§ 6.5. Поведение сапфира при ударном сжатии . . . . .	159

<b>Глава 7. Исследования полиморфных превращений и фазовых переходов при ударном сжатии. . . . .</b>	<b>164</b>
§ 7.1. Полиморфное превращение железа под давлением. . . . .	164
§ 7.2. Превращение графита в алмаз при ударном сжатии . . . . .	166
§ 7.3. Поиск структурных превращений при растяжении. . . . .	170
§ 7.4. Плавление при ударном сжатии и растяжении . . . . .	174
§ 7.5. Затвердевание при динамическом сжатии. . . . .	179
§ 7.6. Испарение при разгрузке из ударно-сжатого состояния. . . . .	182
<b>Глава 8. Определение макрокинетических закономерностей превращения взрывчатых веществ в ударных и детонационных волнах. . . . .</b>	<b>185</b>
Заключение . . . . .	196
Список литературы . . . . .	198