

Ю. И. Мещеряков

**МНОГОМАСШТАБНЫЕ
УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**



Нестор-История
Санкт-Петербург
2018

УДК 539
ББК 22.37
М56

М56 Мещеряков Ю. И.

Многочасштабные ударно-волновые процессы в твердых телах. — СПб. :
Нестор-История, 2018. — 480 с.

ISBN 978-5-4469-1307-7

В монографии отражены результаты экспериментального и теоретического исследования механического поведения твердотельных материалов в условиях ударных нагрузений. Получен критерий перехода динамически деформируемого материала в структурно-неустойчивое состояние как результата смены масштабного уровня деформирования. Разработана кинетическая теория дислокаций в рамках которой смоделирован процесс формирования мезоуровня. Результаты теоретического моделирования сравниваются с экспериментами по ударному нагружению и микроструктурными исследованиями методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

Представленные в монографии работы выполнены в Лаборатории Физики прочности Санкт-Петербургского государственного университета и в Лаборатории Физики разрушения Института проблем машиноведения РАН. Часть 2 монографии написана на основе курсов лекций автора в Санкт-Петербургском государственном университете и Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Книга предназначена для научных работников, занимающихся разработкой и испытанием материалов в условиях ударного нагружения, а также студентов и аспирантов технических вузов и университетов.

**УДК 539
ББК 22.37**

ISBN 978-5-4469-1307-7



9 785446 913077

© Ю. И. Мещеряков, 2018

Предисловие

В квазистатической области деформирования твердого тела концепция многомасштабности начала развиваться с начала 80-х годов прошлого столетия [1–5]. Толчок к ее развитию положили микроструктурные исследования различных материалов, подвергаемых тем или иным видам квазистатического нагружения. Главным результатом этих исследований является установление того факта, что при определенных условиях деформирования происходит коллективизация элементарных носителей деформации, таких как точечные дефекты, дислокации, двойники и другие, и активизация коллективных мод деформирования разных масштабов. Стало очевидным, что предсказательность теории определяется наличием определяющих уравнений для промежуточных масштабных уровней и возможностью учета механизмов энергообмена между масштабными уровнями. Для решения этой проблемы было введена концепция мезоуровня как некоторого промежуточного масштабного уровня между макроуровнем и атом-дислокационным уровнем. Носителями деформации здесь являются конкретные структурные дефекты, которые наблюдаются при микроструктурных исследованиях. Сюда относятся дислокации и дислокационные скопления, полосы локализованного сдвига, ротации, кластеры точечных дефектов, планарные дефекты и их комбинации.

Несмотря на существенное продвижение в понимании *физики* мезоуровня, заметного прогресса в *механике* динамических процессов с использованием мезоскопических свойств материалов пока не достигнуто.

Современные экспериментальные исследования в области высокоскоростных процессов в твердом теле показывают, что распространение ударных волн характеризуется рядом важных свойств, которые не могут быть учтены в рамках традиционных методов континуальной механики сплошных сред, а именно:

- (1) динамическое деформирование протекает на нескольких масштабных уровнях;
- (2) имеет место непрерывный обмен количеством движения и энергией между масштабными уровнями;
- (3) движение волнового фронта неоднородно в пространстве скоростей.

В то время как для моделирования ударно-волновых процессов в однородных средах достаточной характеристикой процесса является пространственно-временной профиль средней массовой скорости частиц среды, в случае структурно-неоднородных материалов оказывается необходимым учитывать

распределение носителей деформации по скоростям. В предлагаемой монографии вводятся в рассмотрение дополнительные данные о динамике материалов, которые основаны на регистрации в реальном масштабе времени скоростной неоднородности процесса динамического деформирования. Используемые в настоящих исследованиях экспериментальные методики регистрации ударно-волновых процессов позволяют за один акт ударного нагружения регистрировать, кроме временного профиля средней скорости, следующие динамические переменные процесса, характеризующие отклик материала на ударное нагружение:

- динамический предел текучести,
- вариацию массовой скорости как характеристику степени скоростной неоднородности процесса динамического деформирования на мезоуровне;
- порог структурной неустойчивости как критериальную характеристику смены режима динамического деформирования от однородного к гетерогенному;
- дефект массовой скорости, который количественно характеризует потенциал импульса и энергии на структурообразование, инициируемое ударным нагружением.

Монография содержит результаты экспериментальных исследований по высокоскоростному деформированию разнообразных металлов и сплавов, включая различные марки конструкционных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, медь различной чистоты, алюминиевых сплавов в микрзернистом и крупнокристаллическом состоянии, а также серию хрупких материалов, таких как бериллий, чугун, горные породы и стекла. Общим для всех исследований является использование единого экспериментального подхода, при котором регистрируются перечисленные выше динамические характеристики отклика материала на ударное нагружение. Данная методика позволила установить факторы, определяющие степень оптимальности термомеханической обработки сталей для использования в том или ином диапазоне скоростей деформации. Оказалось, что наибольшая динамическая прочность реализуется при таких скоростях деформации, при которых выполняются два условия: 1) дисперсия массовой скорости в волне сжатия на мезоуровне-1 (1–10 мкм) равна или больше ее величины на мезоуровне-2 (50–500 мкм) и 2) дисперсия массовой скорости в волне сжатия на мезоуровне-1 равна или больше дефекта массовой скорости. Эти критерии проверены на серии конструкционных сталей, прошедших ударные испытания в широком диапазоне скоростей деформации (глава 5).

В процессе исследований разработана новая методика испытаний, перекрывающая ранее недоступный диапазон скоростей деформации (так называемый «глухой» диапазон). Этот диапазон охватывает скорости деформации, которые не могут быть достигнуты при использовании метода Кольского, т. е. выше 10^3 с^{-1} . С другой стороны, новый метод испытаний охватывает диапазон скоростей деформации ниже скоростей деформации, реализуемых при дефор-

мировании в условиях одноосной деформации, где скорость деформации ниже 10^5 с^{-1} также невозможно реализовать. Существенным преимуществом данной методики является возможность выявления немонотонного характера зависимости предела текучести от скорости деформации, что не представляется возможным при испытаниях с использованием других методов. Этот метод оказался очень эффективным при испытаниях так называемых трубных сталей для магистральных трубопроводов, где длина трещин может достигать сотен метров.

Отдельное место в монографии занимают результаты исследований фазовых превращений, инициированных ударным нагружением, и их влияние на динамическую прочность материалов. В частности, установлено, то мартенситно-стареющие стали, обладающие чрезвычайно высокой прочностью при квазистатических условиях нагружения, теряют прочность при ударно-волновом деформировании (условно говоря, «расстариваются»). Как выяснилось, причиной такого поведения является зарождение прослоек разупрочняющей аустенитной фазы («вторичного» аустенита). Другим примером влияния фазового превращения на динамическую прочность материала является инициированное ударным нагружением (бета-омега) фазовое превращение, обнаруженное в титановых сплавах. Оказалось, что если скорость деформации в зоне тыльного откола выше некоторой критической величины, обратное (омега-бета) фазовое превращение на заднем фронте импульса сжатия не успевает произойти, так что откол реализуется при наличии непрочной хрупкой омега-фазы, что резко (на 25%) снижает откольную прочность титанового сплава. Эти результаты недавно подтверждены в [6], где выполнена серия аналогичных ударных экспериментов с бета-титаном.

Экспериментальные данные по ударно-волновому поведению различных материалов использованы для сопоставления с теоретическими моделями распространения волновых фронтов. Эта часть монографии (часть 2) получила название «Мезомеханика волновых процессов». Проведена постановка задач и даны аналитические решения одномерных движений упруго-пластической среды при использовании определяющих уравнений, основанных на динамике дислокаций — дислокационных вариантов известного уравнения Соколовского–Мальверна. Показано, что при известных механизмах и скоростях размножения дислокаций, для совпадения с экспериментом плотность подвижных дислокаций должна быть на три порядка выше по сравнению с той, которая измерена до ударного нагружения материала. Это свидетельствует о том, что в условиях динамического деформирования работает дополнительный механизм релаксации напряжения, который не учитывается динамикой дислокаций. При включении в определяющее уравнение механизма релаксации напряжения, основанного на мезомеханике пластического деформирования, получено хорошее совпадение экспериментальных волновых профилей с теоретическими. Показано также, что, при переходе высокоскоростного деформирования в структурно-неустойчивый режим течения инициируются осцилляции пластического

течения, что подтверждается в экспериментах по ударному нагружению алюминиевых сплавов, меди, армко-железа и других материалов.

Глава 18 монографии посвящена разработке кинетической теории непрерывно распределенных дислокаций, а также решена задача о формировании мезочастицы, как результата коллективизации поляризованной дислокационной структуры.

В главе 19 разработана двухуровневая модель распространения ударной волны в релаксирующей среде, в которой дислокационный механизм релаксации дополнен мезоскопическим механизмом.

Глава 20 посвящена выработке критерия смены режима динамического деформирования от ламинарного к турбулентному. Показано, что переход от ламинарного течения динамически деформируемой среды к турбулентному происходит тогда, когда скорость изменения дисперсии массовой скорости на мезоуровне выше скорости изменения средней скорости (массового ускорения). Аналогичный результат получен в [7] при использовании нелокальной теории неравновесных процессов переноса.

Глава 21 посвящена модели зарождения очагов пластичности в энергетически активных средах (ВВ) [8]. Наконец, в главе 22 проведено молекулярно-динамическое моделирование процесса распространения фронта волны средней скорости и вариации скорости. Выяснилось, что, в отличие от средней скорости, дисперсия скорости не удваивается при выходе ударной волны на свободную поверхность.

Выполнение экспериментальных исследований проводилось в лаборатории «Физики прочности» Санкт-Петербургского государственного университета и лаборатории «Физики разрушения» Института проблем машиноведения РАН. Автор выражает глубокую благодарность А. К. Дивакову. Им разработан модифицированный тип двухканального скоростного интерферометра, с помощью которого оказалось возможным регистрировать не только профиль средней массовой скорости в ударной волне, но и дисперсию скорости мезочастиц. Автор благодарен Ю. А. Петрову, при участии которого выполнено конструирование и изготовление экспериментальных установок, а также А. И. Чернышенко, В. Б. Василькову и И. П. Макаревичу. Они занимались подготовкой экспериментов и принимали участие в опытах. Автор благодарит Н. И. Жигачеву за проведение микроструктурных исследований материалов. Часть структурных исследований выполнена С. А. Атрошенко и Б. К. Барахтиным, за что автор также выражает им свою благодарность.

Автор признателен Т. А. Хантулевой за обсуждение результатов исследований и сотрудничество.

ЧАСТЬ 1.

Отклик конструкционных материалов на ударное нагружение

ГЛАВА 1.

**Методы исследования ударно-волнового поведения
материалов в диапазоне скоростей деформации 10^4 – 10^7 с⁻¹**

Введение

Изучение фундаментальных основ поведения материалов в условиях динамических нагружений имеет особую важность. Во-первых, становится ясным, что многие практические задачи, такие как вязкое и хрупкое разрушение, распространение волн, импульсная металлообработка, могут быть удовлетворительно изложены только при учете зависящих от скорости деформации свойств материалов. Во-вторых, развитие теории дислокаций, дисклинаций, планарных дефектов также показало, что микромеханизмы, определяющие пластическое течение, обычно также весьма чувствительны к скорости.

Классификация механических испытаний по диапазонам скоростей деформации была предложена Линдхольмом [1.1].

В настоящей монографии приводятся результаты исследований высокоскоростного деформирования материалов при скоростях деформации от 10^4 до 10^7 с⁻¹.

Исторически первыми развивались экспериментальные и теоретические исследования по ударному нагружению стержней [1.2–1.11]. Существуют два главных направления в методике экспериментов по ударному нагружению стержней. Первое направление связано с испытаниями, в которых цилиндрические образцы выстреливаются в толстую стальную броневую плиту при максимальной скорости деформации порядка 10^5 с⁻¹ [1.12–1.14]. Это метод, получивший название метода Тейлора, имеет очень широкое распространение благодаря своей простоте. Метод Тейлора позволяет определять

Таблица 1.1

Скорость деформации								
10^{-8}	10^{-6}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^2	10^4	10^6	c^{-1}
Ползучесть		Квазистатич. испытания		Промежуточн. скорости деформации	Удар стержня		Высокоскоростн. соударение пластин	
← Пренебрежение силами инерции →				← Учет сил инерции →				
← Изотермический процесс →				← Адиабатический процесс →				
← Плоское напряженное состояние →							← Плоская деформация →	

динамический предел текучести материалов в зависимости от скорости деформации. В главе 6 настоящей монографии на примере мартенситно-старееющих сталей проведено исследование применимости этого метода при скоростях деформации до 10^5 с^{-1} [1.15]. Значения предела текучести, полученные в методе Тейлора, сравнивались с данными, полученными при испытаниях в условиях одноосной деформации. Оказалось, что результаты, полученные в двух методах, совпадают только в отсутствие фазового превращения, инициированного ударным нагружением.

Второе методическое направление получило название метода мерных стержней. Метод мерного стержня впервые был применен Гопкинсоном для исследования распространения импульса упругих напряжений [1.16]. В 1949 году Кольским был введен в практику экспериментов так называемый составной мерный стержень [1.17]. Как оказалось, применение методов, основанных на ударных испытаниях стержневых образцов, при высоких скоростях деформации может привести к определенным трудностям, связанным с поперечными инерционными силами и с трением на поверхностях раздела. При скоростях деформации 10^4 с^{-1} и выше использование методики, основанной на ударном нагружении стержневых образцов, оказывается неприемлемым. Одной из причин этого является то обстоятельство, что с увеличением скорости деформации условия одноосного напряженного состояния, перестают выполняться. Предельные скорости деформации и размерные характеристики стержней, при которых возможно применение стержней в случае использования схемы одноосного напряженного состояния, исследованы Г. В. Степановым [1.18]. Показано, что максимальная длина образца определяется соотношением:

$$L_{max} = \sigma_T / \rho C_0 (d\varepsilon / dt), \quad (1.1)$$

где σ_t — предел текучести при квазистатических испытаниях, ρ — плотность материала, C_0 — скорость распространения упругих волн в стержнях и (de/dt) — скорость деформации.

Для получения однородного напряженного состояния по длине образца при высоких скоростях деформации необходимо уменьшать длину образца. Например, для стали с пределом текучести $\sigma_t = 1000$ МПа максимальная длина образца: 25, 2,5, 0,25 см соответствует скоростям деформации $(de/dt) = 10^2, 10^3, 10^4$ с⁻¹, соответственно.

По мере увеличения интереса к высоким скоростям деформации, испытания по ударному растяжению стержней были заменены на испытания путем генерирования плоских волн. Эксперименты с ударным нагружением вещества в плоской геометрии проводятся четырьмя способами.

1. Генерацией ударной волны с помощью заряда ВВ, находящегося в непосредственном контакте с экспериментальной сборкой. В качестве генераторов плоских волн обычно используются конические взрывные линзы [1.19, 1.20]. Это позволяет увеличить скорости деформации до 10^7 с⁻¹.
2. Иницированием ударной волны в плоской мишени за счет высокоскоростного соударения пластин при разгоне последних взрывом [1.21–1.23]. Основным недостатком взрывных методов создания высоких давлений является разрушающее действие взрыва, что приводит к необходимости удаления на большое расстояние (несколько десятков метров и больше) аппаратуры, регистрирующей процессы в образце исследуемого вещества. Во многих случаях это приводит к ухудшению точности и разрешающей способности методик регистрации.
3. Ударным нагружением плоских мишеней с помощью гладкоствольных баллистических установок. В этих установках ударник может разогнаться до скоростей 10–8000 м/с.
4. Импульсным нагружением лазерными и электронными пучками, которое позволяет увеличить скорость деформации до 10^8 – 10^9 с⁻¹ [1.24].

Сложность исследования ударно-волнового поведения материалов заключается в том, что интерпретация данных, полученных из ударных экспериментов, требует учета закономерностей распространения волн, но при этом сами теоретические модели включают искомые экспериментальные данные. Разработка адекватных теоретических моделей, учитывающих влияние скорости деформации, часто затруднена из-за отсутствия детальных пространственно-временных профилей волн и их эволюции в процессе распространения. Подобные данные начали появляться начиная с 1962 года, когда начали регистрировать скорость свободной поверхности при испытаниях в условиях одноосной деформации (плоского соударения ударника и мишени) [1.25]. Часто опубликованные экспериментальные данные не могут быть использованы для сравнения с теоретическими моделями из-за того, что не всегда ясны условия

эксперимента. Наиболее надежными представляются исследования, в которых вместе объединены три составляющих:

- а) ударно-волновое нагружение с регистрацией волновых профилей волн;
- б) микроструктурные исследования образцов после нагружения;
- в) теоретическое моделирование процесса высокоскоростного деформирования.

В отличие от квазистатических скоростей деформации, при воздействии импульсов микросекундной длительности меняется как величина динамического предела текучести, так и вид динамической диаграммы материала. При этом важную роль начинает играть кинетика внутренней структуры материала. В частности, затухание и распространение импульсов давления оказывается зависящим от распределения по скоростям элементарных носителей пластической деформации на нескольких масштабных уровнях. Это ставит на повестку дня вопрос о формулировке кинетической теории элементарных носителей динамической деформации. При этом оказывается, что кинетика элементарных носителей деформации на разных масштабных уровнях может иметь существенные различия — на одном масштабном уровне элементарные носители деформации находятся в равновесном состоянии, в то время как на соседнем уровне кинетика носителей может быть весьма далека от равновесия.

В настоящей монографии не ставится задача описания всего многообразия методов ударно-волнового нагружения материалов. Эти методы достаточно подробно освещены в литературе. Мы коснемся только таких методов ударного нагружения и методов регистрации ударно-волновых процессов, которые использованы в проводимых в настоящей работе исследованиях.

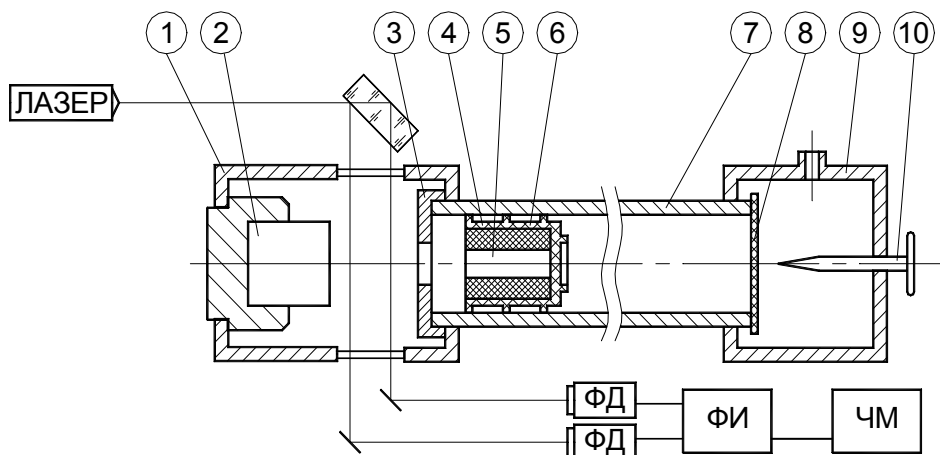
1.1. Ударное нагружение в диапазоне скоростей деформации 10^3 – 10^5 с⁻¹ (метод Тейлора)

В методе Тейлора в качестве образца используется стержень, который разгоняется до требуемой скорости с помощью метательной установки. Значение динамического предела текучести $Y_{дин}$ определяется по формуле 1.2:

$$\frac{Y_{дин}}{\rho U_{уд}^2} = \frac{L_0 - H}{2(L_0 - L_1)} \frac{1}{\ln(L_0/H)}. \quad (1.2)$$

Здесь $U_{уд}$ — это скорость ударника и ρ — плотность материала. Размеры стержня до и после ударного нагружения указаны на рис. 1.3. В соответствии с [1.12] граница между зоной пластичности в стержне и недеформированной областью определяется как место, где диаметр стержня увеличивается на 0,2%.

Функциональная схема испытательной установки представлена на рис. 1.1.



- 1 — защитная вакуумная камера;
- 2 — наковальня (жесткая преграда);
- 3 — фланец;
- 4 — держатель;
- 5 — исследуемый образец;
- 6 — полиэтиленовый пыж;
- 7 — ствол установки;
- 8 — мембрана;
- 9 — камера высокого давления;
- 10 — устройство прорыва диафрагмы

- ФД — фотодиоды;
- ФИ — формирователь импульса запуска частотомера;
- ЧМ — частотомер

Рис. 1.1. Функциональная схема установки для определения динамического предела текучести по методу Тейлора

Для обеспечения перпендикулярности соударения стержня и наковальни, стержень монтируется в специальный поддон из легкого пластика (см. рис. 1.2).

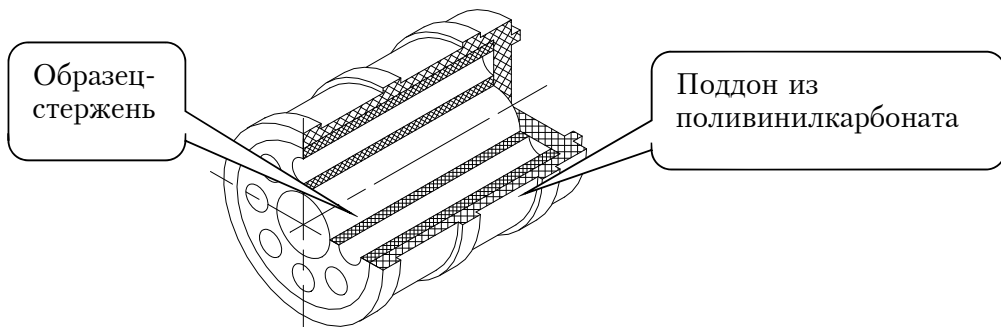


Рис. 1.2. Образец-ударник при испытаниях по методу Тейлора

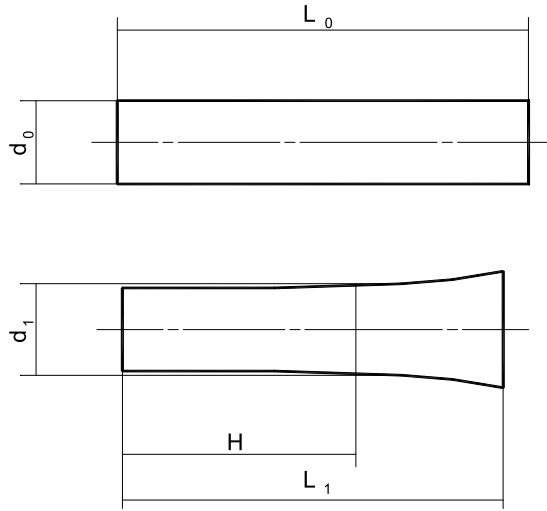


Рис. 1.3. Размерные характеристики стержня при испытаниях по Тейлору

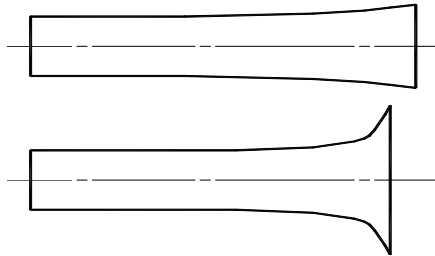


Рис. 1.4. Две возможные формы головной части стержня при испытаниях по Тейлору

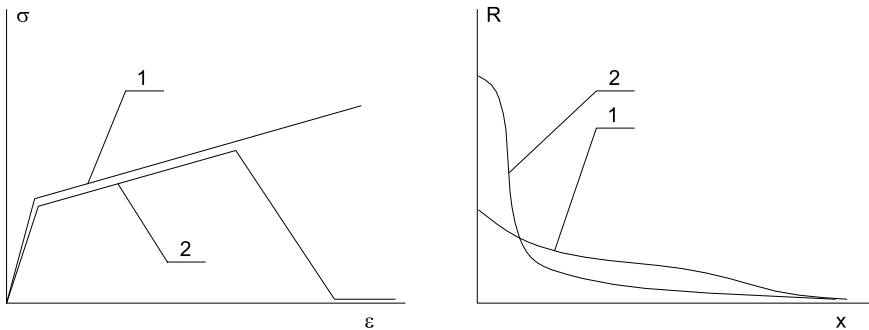


Рис. 1.5. Два типа динамической диаграммы, соответствующие различной форме головной части стержня при испытаниях по Тейлору

Оглавление

Предисловие	3
-------------------	---

ЧАСТЬ 1.

Отклик конструкционных материалов на ударное нагружение

ГЛАВА 1.

Методы исследования ударно-волнового поведения материалов в диапазоне скоростей деформации 10^4 – 10^7 с ⁻¹	7
1.1. Ударное нагружение в диапазоне скоростей деформации 10^3 – 10^5 с ⁻¹ (метод Тейлора)	10
1.2. Ударное нагружение в условиях одноосной деформации	13

ГЛАВА 2.

Регистрация динамического отклика материалов на ударное нагружение	19
2.1. Измерения с помощью пьезодатчиков	20
2.2. Измерения с помощью интерферометров	22
2.3. Скоростные интерферометры	31

ГЛАВА 3.

Определение динамических характеристик пластичности конструкционных материалов в диапазоне скоростей деформации 10^3 – 10^5 с ⁻¹	51
3.1. Методика эксперимента	52
3.2. Материалы и результаты испытаний	59
3.3. Испытание стали X-80	62

ГЛАВА 4.

Мезомеханика динамического деформирования	65
4.1. Физика мезоуровня	67
4.1.1. Квазистатическое деформирование [4.3]	67
4.1.2. Динамическое деформирование	72

ГЛАВА 5.

Роль мезоструктурных эффектов в динамической пластичности и прочности материалов [5.12].....	78
5.1. Мезо-макро энергообмен и многомасштабное динамическое деформирование и разрушение.....	78
5.2. Материалы и результаты испытаний.....	81
5.3. Микроструктурные исследования.....	92
5.4. Анализ прочностного поведения сталей.....	99
5.5. Мезо-макро энергообмен и откольная прочность материалов.....	102
5.6. Некоторые типы ротационного движения динамически деформируемой среды.....	107

ГЛАВА 6.

Ударно-волновое поведение мартенситно-стареющих сталей — сравнительные испытания в условиях одноосной деформации и по методу Тейлора.....	113
6.1. Материалы и результаты эксперимента.....	114
6.1.1. Мартенситно-стареющая сталь 02X18K9M5-ВИ.....	118
6.1.2. Мартенситно-стареющая сталь 02H16K9M5T1.....	123
6.1.3. Мартенситно-стареющая сталь 05X12H5K14M5ТВ.....	124
6.2. Микроструктурные исследования.....	127
6.3. Обсуждение результатов.....	130

ГЛАВА 7.

Структурные неустойчивости, инициированные ударным нагружением, и динамическая прочность твердых тел.....	133
7.1. Методика и результаты эксперимента.....	136
7.2. Структурная неустойчивость при ударном сжатии и сопротивление материала высокоскоростному внедрению.....	143
7.3. Влияние скоростной неоднородности динамического деформирования на глубину проникания удлиненных ударников [7.15].....	144

ГЛАВА 8.

Динамическая рекристаллизация, инициированная ударным нагружением.....	146
8.1. Скоростная неоднородность процесса деформирования и динамическая рекристаллизация при ударном нагружении.....	147
8.2. Мезо-макро энергообмен и пороговые режимы динамического деформирования.....	159

8.3. Металлография и рентгеноструктурные исследования	166
8.4. Обсуждение результатов	171
ГЛАВА 9.	
Локализованная структурная неустойчивость и динамическая прочность хрупких материалов	177
9.1. Материалы и результаты экспериментов	177
9.2. Обсуждение результатов	185
ГЛАВА 10.	
Фазовые превращения, инициированные ударным нагружением, и откольная прочность титановых сплавов	189
10.1. Влияние условий нагружения на процессы фазовых превращений и откол в титановых сплавах	190
10.2. Рентгено-структурные исследования сплава ВТ14	200
10.3. Влияние режима термомеханической обработки на откольную прочность титанового сплава Ti-6Al-4V	203
10.4. Влияние структурного состояния	204
10.5. Влияние содержания примеси кислорода	208
ГЛАВА 11.	
Динамическая прочность азотосодержащей стали	212
11.1. Материалы и результаты испытания	212
11.2. Структурные исследования	221
ГЛАВА 12.	
Сравнительные ударные испытания алюминия в крупно- и микрокристаллическом состояниях	224
12.1. Характеристика материалов	224
12.2. Результаты испытаний	226
12.3. Микроструктурные исследования	236
12.4. Обсуждение результатов и выводы	240
ГЛАВА 13.	
О механизме зарождения локализованных 3D- структур, инициируемых ударным нагружением	242
13.1. Методика исследования	242
13.2. Структурные исследования и обсуждение результатов	248

ЧАСТЬ 2.**Мезомеханика волновых процессов**

ГЛАВА 14.

Стационарные волновые фронты в материале с экспоненциальной зависимостью скорости дислокаций от напряжения	253
14.1. Определяющее уравнение для изотропной однородной среды с регенеративным законом размножения дислокаций	255
14.2. Структура стационарного пластического фронта в изотропном материале	258
14.3. Определение параметров дислокационной структуры из временного профиля пластического фронта	263
14.4. Структура стационарного упруго-пластического фронта в анизотропном материале.....	267

ГЛАВА 15.

Стационарные волновые фронты в материале с линейной зависимостью скорости дислокаций от напряжения	271
15.1. Изотропный случай	271
15.2. Анизотропный случай.....	273
15.3. Оценка границ применимости дислокационной модели, основанной на регенеративном законе размножения дислокаций.....	275

ГЛАВА 16.

Стационарные волновые фронты в материале с гетерогенным механизмом размножения дислокаций.....	282
16.1. Определяющее уравнение для случая гетерогенного размножения дислокаций	282
16.2. Структура стационарного пластического фронта в материале с гетерогенным размножением дислокаций	284
16.3. Осцилляции пластического фронта.....	290

ГЛАВА 17.

Нестационарные волновые фронты в материале с дислокационной кинетикой пластического деформирования.....	295
17.1. Нестационарная задача импульсного деформирования среды в нулевом приближении по параметру разложения дислокаций $M\gamma$	296
17.2. Нестационарная задача импульсного деформирования среды с дислокациями в первом приближении по параметру разложения $M\gamma$	302
17.3. Нестационарные упруго-пластические волны в монокристаллах.....	304

17.4. Расчет характеристик дислокационной структуры из кривых затухания упругого предвестника.....	309
17.5. Установление пластического фронта. Число Бленда	311

ГЛАВА 18.

Кинетическая теория непрерывно распределенных дислокаций.

Формирование мезоуровня.....	318
18.1. Функция распределения дислокаций по скоростям и ее статистические моменты.....	321
18.2. Кинетическое уравнение	324
18.3. Равновесная функция распределения дислокаций по скоростям	327
18.4. Диффузионные коэффициенты уравнения Фоккера–Планка	330
18.5. Интеграл взаимодействия кинетического уравнения для дислокационной структуры, учитывающий изменение средней плотности дислокаций.....	339
18.6. Затухание субмикросекундных импульсов давления в кристалле с непрерывно распределенными дислокациями	340
18.7. Переносные уравнения	350
18.8. Формирование мезоструктуры при ударном нагружении.....	356
18.9. Кинетика дислокаций и структура пластических волн.....	362

ГЛАВА 19.

Многомасштабная модель стационарного волнового фронта

в релаксирующей среде.....	370
19.1. Обмен моментом количества движения между масштабными уровнями	371
19.2. Динамика дислокаций и распространение стационарного фронта	377
19.3. Учет мезоскопических эффектов	380

ГЛАВА 20.

Смена режима динамического деформирования.....	391
20.1. Модели двухуровневой динамики среды.....	391
20.2. Функция распределения частиц по скоростям и ее статистические моменты.....	394
20.3. Мезо-макро энергообмен и распространение волн в среде с дисперсией скорости мезочастиц	397
20.4. Об управлении режимом структурообразования при динамическом деформировании	407

ГЛАВА 21.

Вихревая модель упруго-пластического течения

при ударном нагружении ВВ [9]	411
21.1. Результаты экспериментальных исследований	413
21.2. Модели зарождения и роста очагов пластичности	417
21.3. Сферический очаг	419
21.4. Источник движения внутри очага пластичности	422
21.5. Макроскопические уравнения диссипации энергии	423
21.6. Чистый сдвиг	424
21.7. Размеры и рост пластического очага	427
21.8. Нагревание вещества за счет пластической деформации	432
21.9. О модели «разрушения» при ударе по упруго-пластической среде	434

ГЛАВА 22.

Компьютерное исследование влияния дисперсии скоростей мезочастиц

на процесс распространения ударной волны [8.22]	437
22.1. Метод исследования	437
22.2. Результаты	439
22.3. Обсуждение	444

Литература	447
------------------	-----

Юрий Иванович Мещеряков

**Многомасштабные ударно-волновые процессы
в твердых телах**

Корректор *Н. В. Стрельникова*
Оригинал-макет *А. А. Крыласов*
Дизайн обложки *А. А. Крыласов*

Подписано в печать 28.08.2018. Формат 70×100/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл.-печ. л. 36,73
Тираж 100 экз. Заказ № 1143

Отпечатано в типографии
издательства «Нестор-История»
Тел. (812)235-15-86

По вопросам приобретения книг
издательства «Нестор-История»
звоните по тел.: +7 965 048 04 28

Все книги издательства «Нестор-История»

можно приобрести по адресу:

Санкт-Петербург, ул. Петрозаводская, д. 7, тел. +7(965)048-04-28

Москва, Раушская набережная, 4/5, строение 1, кабинет 218,

тел. +7 (499) 755 96 25

или заказать:

www.nestorbook.ru

По вопросам оптовой торговли обращайтесь:

Санкт-Петербург, ул. Петрозаводская, д. 7, тел. 8-965-048-04-28

