МИНОБРАНАУКИ РОССИИ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра теоретической механики

Работа допущена к защите
Зав. кафедрой
_____А. М. Кривцов
“ ” июня 2015 г.

**ДИССЕРТАЦИЯ**
на соискание академической степени
**МАГИСТРА**

Тема: Определение характеристик динамической прочности и пластичности материала в условиях ударного нагружения в диапазоне скоростей деформации $10^5 \div 10^7$ $с^{-1}$

Направление: 010800 «Механика и математическое моделирование»

Выполнил:
Студент гр.63604/1 Яшин Алексей Владимирович

Руководитель:
Профессор, д.ф.-м.н. Мещеряков Юрий Иванович

Консультант
по вопросам охраны труда: Виктор Владимирович Монашков

Санкт-Петербург
2015

## Реферат

Работа содержит 57 страниц, 15 рисунков, 3 таблицы.


## Ключевые слова

Легкогазовая пушка, массовая скорость, скоростной интерферометр, профиль скорости свободной поверхности мишени, дисперсия, критерий перехода в структурно неустойчивое состояние, динамические характеристики.


## Краткая аннотация


В настоящей работе излагается метод регистрации волновых процессов в ударно-нагружаемых материалах, основанный на лазерном интерференционном зондировании свободной поверхности мишени. Метод позволяет за один акт ударного нагружения зарегистрировать не только временной профиль средней (макроскопической) скорости свободной поверхности мишени, но также временную эволюцию характеристик распределения по скоростям носителей деформации на двух более низких структурных уровнях. Благодаря этому оказывается возможным фиксировать величины пороговых напряжений, при которых начинается локализация сдвиговой деформации и разрушения материала в волне нагрузки. Наличие этих данных позволяет строить более реалистические модели динамического деформирования и разрушения материалов, используя их в качестве внутренних переменных.

## Оглавление

Введение ..... 4
Цели и задачи ..... 5
1. Классификация механических испытаний по диапазонам скоростей деформаций ..... 6
2. Установки для метания тел со сверхвысокими скоростями ..... 9
2.1. Многоступенчатые легкогазовые пушки ..... 9
2.2. Взрывное метание ..... 12
2.3. Электромагнитные ускорители ..... 14
3. Экспериментальное исследование распространения ударных волн ..... 17
4. Эволюция диагностики ударно-волнового процесса ..... 19
4.1. Цилиндр Тейлора ..... 19
4.2. Разрезной стержень Гопкинсона ..... 20
5. Измерение массовой скорости ..... 23
5.1. Интерферометр смещения ..... 24
5.2. Скоростной интерферометр VISAR ..... 24
5.3. Скоростной интерферометр ..... 25
6. Мезо - макро энергообмен ..... 30
7. Методика эксперимента ..... 35
8. Эксперимент ..... 42
9. Расчет динамических характеристик ..... 47
Выводы ..... 48
Приложение. Безопасность жизнедеятельности ..... 49
Список литературы ..... 54

## Введение

Процесс соударения твердых тел только при относительно малых скоростях сопровождается упругими деформациями материалов соударяющихся тел, так что проблема количественного описания характеристик процесса и прогноза его последствий сводится к начально-краевой задаче динамической теории упругости. В большинстве иных случаях, представляющих научный и прикладной интерес, скорости соударения таковы, что материал испытывает значительные необратимые деформации и разрушается. В результате задача количественного описания резко осложняется, поскольку, с одной стороны, для ее решения требуются сведения о свойствах материала при его неупругом деформировании и разрушении, а с другой - модельные построения для адекватной ее математической формулировки. Именно по этой причине проблема соударения твердых тел представляет собой не частный вопрос динамики твердого деформируемого тела, а целое научно-техническое направление исследований, интенсивно развивающееся в последнее время. Интерес к данной области, возникший достаточно давно и продиктованный требованиями военной техники, резко возрос в годы второй мировой войны и, особенно в послевоенное время в связи с новыми задачами техники, в частности космической и по-прежнему военной, а также в связи с чисто научной проблематикой в области изучения поведения материалов при больших давлениях и скоростях нагружения.

## Цели и задачи

- Теоретический анализ работы лазерного интерферометра смещения и лазерного дифференциального интерферометра;
- Сборка, настройка и отладка двухканального скоростного интерферометра для измерения скорости свободной поверхности ударно нагружаемых мишеней;
- Ударные испытания мишеней из алюминиевого сплава Д-16;
- Расшифровка интерферограмм;
- Анализ результатов:
    1) Определение средней скорости свободной поверхности U(t),
    2) Определение величины дисперсии D(t),
    3) Определение динамического предела текучести,
    4) Определение дефекта массовой скорости,
    5) Определение откольной прочности.

## 1. Классификация механических испытаний по диапазонам скоростей деформаций

Уравнение состояния материала в его наиболее общей форме должно описывать поведение материала при всех возможных значениях скорости деформации. Однако даже в случае одноосного напряженного состояния вывести такое уравнение чрезвычайно трудно, и поэтому большинство уравнений состояния обычно применимо лишь в узком диапазоне скоростей деформаций. Это обстоятельство не находится в противоречии с физической сутью явления, поскольку в различных диапазонах скоростей деформаций доминируют различные физические механизмы. Динамическая классификация механических испытаний по диапазонам скоростей деформаций (рис. 1.1) была предложена Линдхольмом [1].

Рис. 1.1. Динамическая классификация механических испытаний по диапазонам скоростей деформаций.

При скоростях деформаций от $10^{-6}$ до $10^{-5}$ $с^{-1}$ определяющим фактором, особенно для металлов при высоких температурах, является ползучесть, и поведение материалов в этом диапазоне описывается законами типа законов ползучести. При более высоких скоростях деформаций (от $10^{-4}$ до $10^{-3}$ $с^{-1}$) для описания поведения материалов используют условия одноосного растяжения или сжатия, а также квазистатическую зависимость напряжения от деформации, полученную при постоянной скорости деформации. Хотя часто считается, что квазистатическая зависимость выражает основные свойства материала, ее применимость ограничена той скоростью деформации, при которой проводились испытания. С увеличением скорости деформации может измениться сам характер связи между напряжением и деформацией, что заставляет прибегать к другим видам испытаний. Специальное экспериментальное оборудование позволяет проводить эксперименты с постоянной скоростью деформации до ее значений порядка $10^{4}$ $с^{-1}$. Скорости деформаций в диапазоне от $10^{-1}$ до $10^{2}$ $с^{-1}$ обычно определяются как промежуточные, или средние. Именно в этом диапазоне становятся заметными эффекты скорости деформации в большинстве металлов, хотя в некоторых случаях их влиянием еще можно пренебречь. Скорости деформаций от $10^{3}$ $с^{-1}$ и выше обычно характеризуют высокоскоростное деформирование. Однако точного определения режимов деформирования пока не существует.

При интерпретации экспериментальных данных высокоскоростного деформирования особенно важным становится учет инерции и эффектов распространения волн. Следует также отличать средние значения напряжений и деформаций от локальных, возникающих в результате прохождения по материалу одной или более высокоинтенсивных волн напряжений. При скоростях деформации $10^{5}$ $с^{-1}$ по материалу, находящемуся в одноосном деформированном состоянии, распространяются ударные волны. При таких очень высоких скоростях деформаций и соответственно

очень малых масштабах времени существенным становится рассмотрение термодинамики процесса; мы переходим от изотермического к адиабатическому приближению.

Методику исследования поведения твердого тела в высокоскоростных испытаниях можно разделить на три крупные области:

1. Установки для метания тел со сверхвысокими скоростями;
2. Модель деформации;
3. Система измерений.

## 2. Установки для метания тел со сверхвысокими скоростями

Известные устройства для метания макроскопических тел со сверхвысокими скоростями можно разделить на многоступенчатые легкогазовые пушки, устройства для взрывного метания и электромагнитные пушки. Ниже рассматриваются характеристики пусковых установок этих типов и их разновидностей.

### 2.1. Многоступенчатые легкогазовые пушки

Многоступенчатые легкогазовые пушки подобны обычным пороховым орудиям в том смысле, что в них для ускорения системы снаряд-поддон используется сжатый газ из ресивера. Скорость снаряда в процессе ускорения определяется выражением:

$$\mathrm{Up} = \left(\frac{2A}{\mathrm{m}} \int_0^{\mathrm{X0}} \mathrm{Pdx}\right)^{1/2},$$

где P - давление в канале ствола за донным срезом снаряда (или поддона), которое всегда меньше давления в ресивере, поскольку часть энергии газа идет на его разгон до скорости, равной мгновенной скорости снаряда. Эта часть энергии метающего газа не может быть использована для ускорения снаряда. В результате в канале ствола возникает градиент давления на участке от ресивера до донного среза снаряда. Разность давлений $P_r$-P зависит от скорости снаряда и свойств метающего газа, в первую очередь от скорости звука в нем.

В двухступенчатых легкогазовых пушках применяются газы с малой молекулярной массой (водород и гелий), которые можно разогнать до ультравысоких скоростей, чтобы сообщить системам снаряд-поддон сверхвысокие скорости. Схема устройства и действия двухступенчатой легкогазовой пушки представлена на рис. 2.1.

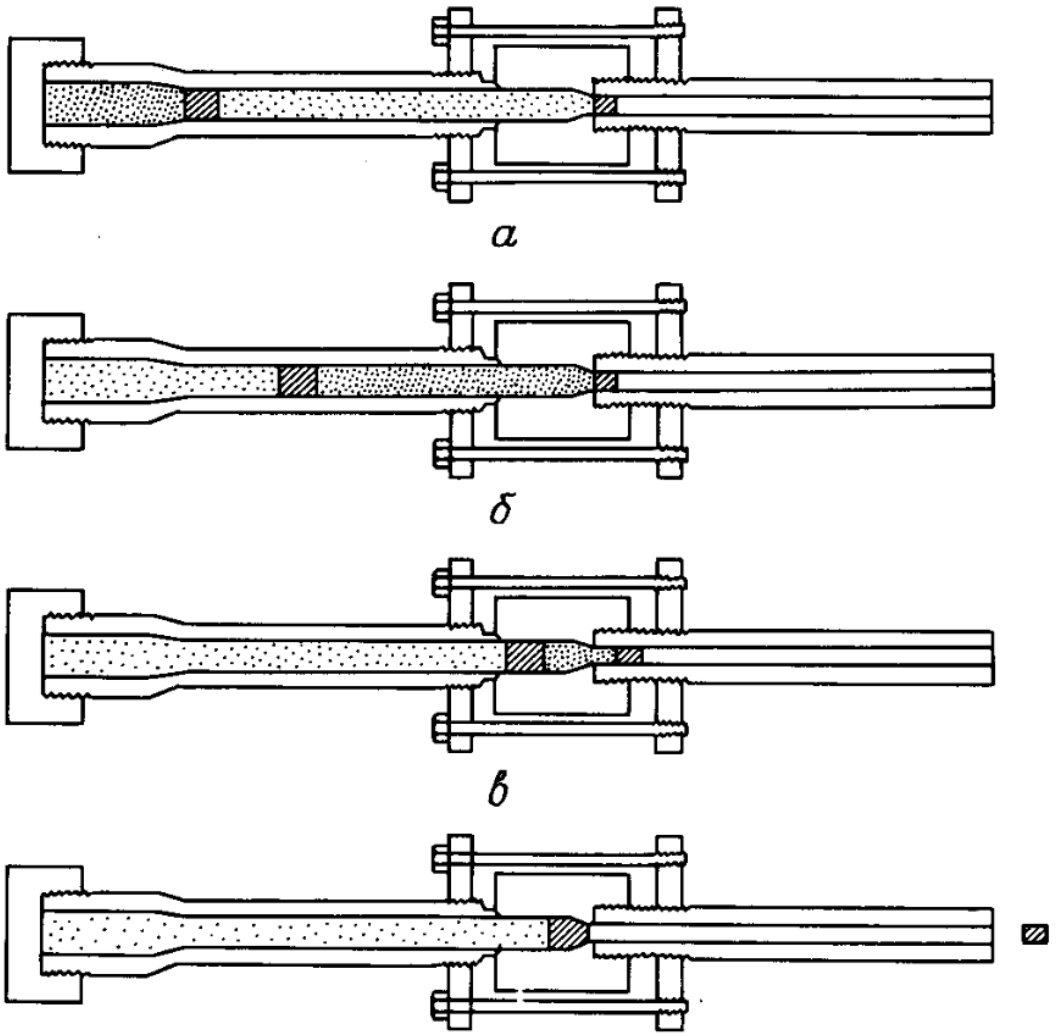



Рис. 2.1. Схема устройства и действия двухступенчатой легкогазовой пушки.

Дульный срез обычной гладкоствольной пороховой пушки заключен в массивный стальной блок, в котором установлены также переходная секция, клапан, открывающийся при повышении давления, и казенная часть ствола второй ступени, калибр которого меньше калибра ствола первой ступени. Снаряд вместе с поддоном помещается в казенной части ствола второй ступени. Из замкнутого объема первой ступени откачивают воздух и заменяют его водородом или гелием. При выстреле пороховой заряд воспламеняется, и давление пороховых газов гонит вперед снаряд первой ступени (поршень), который сжимает газ, заполняющий пространство перед ним. Поскольку скорость поршня существенно меньше скорости звука в легком газе, сжатие происходит почти адиабатически. Тем не менее, в непрерывно сокращающемся столбе газа перед поршнем возникают

возмущения, распространяющиеся как в направлении движения поршня, так и в обратном направлении. Давление в казенной части ствола второй ступени стремительно растет до тех пор, пока поршень не войдет в переходную секцию, а давление не достигнет критического значения, при котором срабатывает механизм клапана. Как только это произойдет, снаряд начинает двигаться по стволу второй ступени, и изменение объема легкого газа приобретает более сложный характер, так как теперь он определяется совместным движением поршня и снаряда. Давление газа в канале ствола подскакивает до нескольких сот мегапаскалей в момент открытия клапана и превышает 1 ГПа и затем по мере приближения снаряда к дульному срезу ствола второй ступени быстро падает, а остаток кинетической энергии поршня расходуется на его деформацию в переходной секции.

Обычно легкогазовые пушки используются для сообщения снарядам скоростей до 7,5 км/с. В ряде случаев были получены скорости до 8,5 км/с. Однородные малогабаритные снаряды из пластичных материалов низкой плотности удавалось разгонять до 12 км/с. В настоящее время легкогазовые пушки - единственный вид пусковых установок, позволяющих метать со сверхвысокими скоростями снаряды заданной формы, изготовленные из материалов, представляющих практический интерес. Именно поэтому они так широко применяются при исследовании соударений со сверхвысокими скоростями.

В самом начале исследований движения со сверхвысокими скоростями было показано, что точные данные можно получить лишь в том случае, если снаряд помещен в поддон, так как при соприкосновении с поверхностью канала ствола легкогазовой пушки материал снаряда в процессе выстрела эродирует настолько, что масса снаряда становится неопределенной – во всяком случае, о ней нельзя судить по значению, измеренному перед пуском.

## 2.2. Взрывное метание

Другим широко распространенным способом метания макроскопических тел со сверхвысокими скоростями является метание с использованием зарядов твердых взрывчатых веществ (ВВ). В этом случае длина пути, на котором ускоряется метаемое тело, сравнительно мала, а ускорения очень велики ($10^9$-$10^{11}$ м/с$^2$). Обычные снаряды не могут выдержать развивающихся при этом перегрузок и были бы буквально разорваны на части. Искусство создания ускорителей для взрывного метания заключается не в том, чтобы придать заряду форму, обеспечивающую максимальное ускорение снаряда, так как в этом случае он в процессе пуска наверняка будет сильно деформирован, а в том, чтобы выбрать такую форму заряда, при которой распределение давления по донному срезу метаемого снаряда было бы практически постоянным. Одним из успешных решений такого рода является полый заряд, схема которого представлена на рис. 2.2.

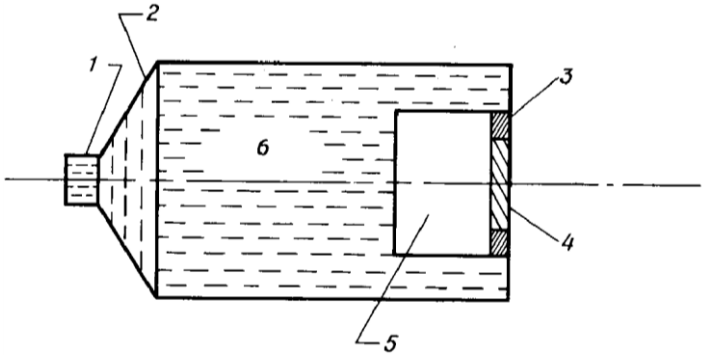



Рис.2.2. Полый взрывной заряд для метания снарядов в форме диска.

1-детонатор; 2- генератор взрывной волны; 3- фиксирующее кольцо; 4- снаряд; 5-полость; 6- основной заряд;

За донным срезом снаряда, установленного заподлицо с передней поверхностью взрывного заряда, имеется полость, в которой создается газовая подушка, снижающая пиковое давление, действующее на донный срез снаряда и одновременно увеличивающая время, в течение которого ему сообщается необходимый импульс. Полный импульс столба газа за донным срезом снаряда можно значительно увеличить, используя явление

фокусировки ударных волн, известное, как образование диска Маха. Скачки уплотнения, распространяющиеся от боковой поверхности полости, сжимают растекающийся в боковом направлении газ, выбрасываемый со дна полости во время его движения к донному срезу снаряда. Диаметр метаемого снаряда выбирается примерно равным теоретическому диаметру диска Маха. Снаряд вставляется в фиксирующее кольцо, изготовленное из того же материала. Внешний диаметр кольца равен диаметру полости в заряде. Кольцо работает в условиях большого перепада давлений, поскольку давление на его внутреннюю поверхность гораздо больше, чем на внешнюю. При резком продольном ускорении снаряда в нем возникают волны сжатия, распространяющиеся в радиальном направлении. Эти волны проходят сквозь поверхность контакта между снарядом и кольцом и отражаются от внешней поверхности кольца в виде волн растяжения, которые распространяются в обратном направлении и фокусируются. Волны растяжения не могут пройти сквозь поверхность контакта между кольцом и снарядом, и поэтому они вновь от нее отражаются и оказываются захваченными кольцом. Совместное действие перепада давления и радиальных волн приводит к разрыву кольца и разлету его осколков в радиальном направлении, в то время как неповрежденный снаряд летит вперед. Применение полых взрывных устройств позволяет метать снаряды, имеющие форму дисков с удлинением до 0.3, сообщая им скорости до 6 км/с. Чтобы добиться желаемых результатов, приходится тщательно выбирать конфигурацию заряда, а затем отрабатывать ее экспериментально. Такие устройства оказались очень полезными при исследованиях соударений, требующих многократного повторения аналогичных опытов, однако они плохо приспособлены для проведения испытаний, при которых условия соударения меняются в широких пределах.

## 2.3. Электромагнитные ускорители

Завершая рассмотрение пусковых установок, способных сообщать телам сверхвысокие скорости, упомянем ускорители нового типа, эффективность которых уже была доказана на практике, а возможности еще далеко не исчерпаны. Это электромагнитные рельсовые пушки на постоянном токе, устройство которых схематически показано на рис. 2.3.

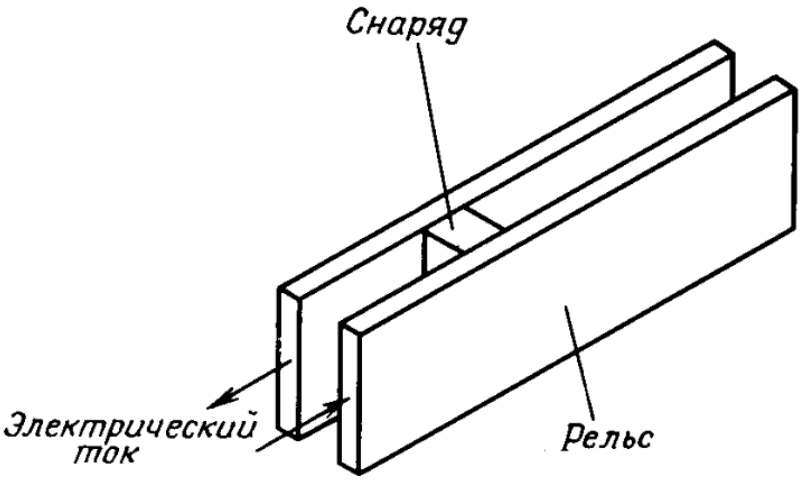



Рис. 2.3. Схема электромагнитной рельсовой пушки на постоянном токе.

Электрический ток течет по одному из двух параллельных рельсов, затем по подвижной перемычке между ними и возвращается к источнику питания по другому рельсу. При этом в окрестности перемычки создается электромагнитное поле, которое, взаимодействуя с текущим по ней током, создает силу, направленную вдоль рельсов:

$$F_p = L'I2$$

Как видим, величина этой силы определяется индуктивностью L', отнесенной к длине рельсов, и квадратом силы тока I. Первые попытки создания ускорителей, действующих на этом принципе, не увенчались успехом, поскольку, как недавно выяснилось, для их питания применялись неподходящие источники постоянного тока. Как и в случае пусковых установок других типов, эффективность электромагнитных ускорителей в значительной мере определяется соотношением между средним и максимальным ускорениями, которые испытывает снаряд в процессе пуска.

Если пиковое ускорение слишком велико, то снаряд и поддон при сообщении им полного импульса, необходимого для набора сверхвысокой скорости, разрушаются. Из уравнения следует, что оптимальный режим работы электромагнитной рельсовой пушки достигается, когда сила тока в установке остается постоянной. На практике это трудно осуществить, так как полное сопротивление пусковой установки Z пропорционально скорости движения перемычки, с которой оно связано соотношением:

$$Z=Z_0+ L'U_p$$

Следовательно, чтобы сила тока оставалась постоянной, напряжение на зажимах пушки должно увеличиваться на несколько порядков величины.

До разработки в Австралийском национальном университете специальной системы энергопитания не было известно ни одного источника постоянного тока, который удовлетворял бы этим требованиям. Основу системы составляет униполярный генератор, представляющий собой низковольтный источник постоянного тока большой силы, который используется для возбуждения в индукторе тока в несколько сот тысяч ампер. По достижении критического значения тока индуктор подключается к электромагнитной рельсовой пушке на постоянном токе, питая ее накопленным в нем током. В этом устройстве индуктор, по существу, играет роль источника постоянного тока, который автоматически регулирует напряжение на зажимах пушки независимо от сопротивления нагрузки. В проведенных экспериментах напряжение на зажимах электромагнитной рельсовой пушки в процессе ускорения снаряда возрастало от ~ 100 В до более чем 15 кВ. При массе метаемого тела до 3 г были получены максимальные скорости до 6,5 км/с. Профили ускорения снаряда, электрические характеристики процесса выстрела и значения дульной скорости снаряда, полученные в этих экспериментах, совпали с расчетными в пределах нескольких процентов.

Расчеты показывают, что этот способ метания в том виде, как он описан, или с некоторыми изменениями позволяет сообщать телам скорость 15 км/с и более. Наметились три области его практического применения. Первая - создание артиллерийских орудий с дульными скоростями, вдвое большими, чем у существующих. Вторая-использование высокоэффективных электромагнитных пушек (с дульными скоростями более 10 км/с) в качестве двигательных установок для космических аппаратов. Отдача при стрельбе из таких орудий создаст среднюю реактивную силу, во много раз превышающую тягу современных ионных двигателей. Третья область применение-моделирование столкновений с метеороидами при скоростях более 12 км/с, когда материал и снаряда, и мишени мгновенно превращается в пар, как это действительно наблюдается при полетах в космическом пространстве.

## 3. Экспериментальное исследование распространения ударных волн

Единственным методом диагностики, пригодным при сверхвысоких скоростях деформирования, заключается в детальном изучении распространения неупругих волн. Однако такой метод не является прямым для получения информации о динамических свойствах, так как для изучения процесса необходимо применение теории распространения волн, которая в свою очередь требует знания искомого уравнения состояния. Это уравнение состояния, в свою очередь, должно быть получено из проводимых экспериментов. Поэтому единственно возможной остается непрямая, итеративная процедура, не обязательно приводящая к единственному результату. Такая процедура состоит в следующем:

1) Задают некоторый вид уравнения (уравнений) состояния и предполагаемые значения материальных констант.

2) Проводят экспериментальное исследование распространения волн и находят или регистрируют входные величины или краевые условия, а также информацию о процессе распространения волн, такую, как зависимость деформации от времени, скорость свободной поверхности, скорости волн и т.п.

3) Проводят теоретический анализ наблюдаемого процесса на основе соответствующей теории распространения волн и принятого уравнения состояния.

4) Сравнивают результаты теоретических расчетов с экспериментальными данными. Повторяют шаги 1-4.

5) Используют другой вариант опыта или другие экспериментальные данные для проверки полученных результатов.

Видно, что такая процедура последовательных приближений может привести к неоднозначному решению. Важной особенностью такой процедуры является использование теории распространения волн в качестве отправного шага и формирование уравнения состояния на логичной физической основе.

Для многих конструкционных материалов продольные пластические волны в брусах или стержнях дисперсионны по своей природе и затухают по мере распространения по стержню. Причем затухание происходит довольно быстро, хотя вблизи ударяемого конца стержня время нарастания импульса может быть мало и, следовательно, могут быть достигнуты высокие скорости деформации. Измерения процесса распространения волн, проведенные в стержне на разных расстояниях от ударяемого конца, свидетельствуют, что обычно скорости деформации не превышают 100 $с^{-1}$ Более того, часто само изменение величины скорости деформации невелико. Таким образом, с помощью любого уравнения состояния, достаточно точно описывающего напряженно-деформированное состояние в узком диапазоне скоростей деформации, можно удовлетворительно объяснить наблюдаемый процесс распространения волн. Ввиду указанной неоднозначности решения и невозможности достижения очень высоких скоростей деформации эксперименты с пластическими волнами в стержнях нельзя считать эффективным методом построения уравнений состояния. С другой стороны, очень высокие скорости деформации можно получить в условиях одноосного деформированного состояния. Но тогда напряженное состояние имеет преимущественно гидростатическую природу, что затрудняет определение эффектов влияния скорости деформации, так как в этих условиях трудно выявить вклад касательных напряжений. В следующих разделах определены соотношения типа напряжение-деформация-скорость деформации в материалах с помощью экспериментов, в которых при высоких скоростях деформации реализуется почти однородное одноосное деформированное или напряженное состояния, а для обработки данных не требуется анализа распространения волн.

## 4. Эволюция диагностики ударно-волнового процесса

### 4.1. Цилиндр Тейлора

Первая методика определения динамической характеристики была разработана Тейлором [2] и Уиффином [3] в 1948 году. В эксперименте изучался предел текучести по измерению распределения остаточных деформаций в прямом круговом цилиндре после его удара о жесткую преграду.

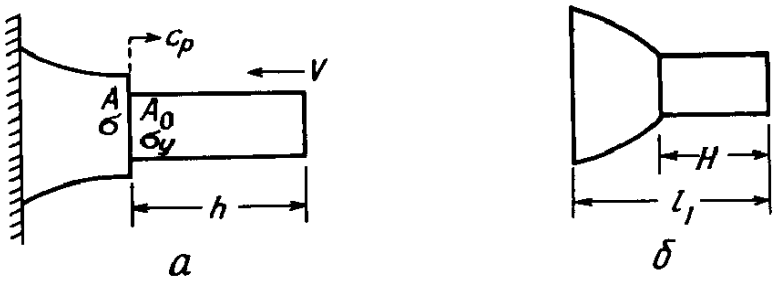



Рис. 4.1. Схема цилиндра Тейлора.

Предложенный Тейлором анализ основан на предположении об одномерном распространении волн в жесткопластическом материале. На рис. 4.1. а) показан цилиндр в некоторый момент деформирования. Деформированная область распространяется от жесткой стенки со скоростью $c_p$, в то время как недеформированная часть цилиндра, текущая длина которой h, перемещается с убывающей скоростью V. Предполагается, что уравнение состояния:

$$\alpha = \alpha\ (\varepsilon)$$

не зависит от скорости деформации и что материал жесткопластический, т. е. упругие деформации пренебрежимо малы. В данной методики единственная измеряемая характеристика ударного нагружения в реальном времени – скорость ударника.

Экспериментальный метод Тейлора был детально проанализирован в работе [4] на основе двумерной конечно-разностной численной схемы. Было установлено, что он дает приемлемые величины среднего динамического предела текучести. Однако, согласно результатам численного расчета [5], для

высокопрочных материалов формула Тейлора дает значительное завышение. Вариант формулы Тейлора, учитывающий упругие деформации, представлен в работе [6]. Из экспериментов с цилиндром Тейлора определены динамические характеристики металлов, в частности динамический предел текучести [7]. Здесь же в анализ включен учет упругости, упрочнения и нелинейности и предложены различные виды уравнений состояния. Установлена адекватность предположения об одномерности движения. До скоростей удара около 300 м/с деформация преграды не возникала. Лучшее согласие с экспериментом получено для модели жесткого упрочняющегося материала, поэтому отмечена важность включения упрочнения в модель материала. Рехт [8] расширил рамки модели Тейлора на случай нежесткой преграды.

## 4.2. Разрезной стержень Гопкинсона

Одним из наиболее широко применяемых в экспериментальной практике устройств для изучения поведения материала при высоких скоростях деформации является разрезной стержень Гопкинсона, усовершенствованный Кольским [9] в 1949 году. Принцип действия стержня Гопкинсона заключается в определении динамических напряжений, деформаций или перемещений на конце стержня по данным, полученным на некотором расстоянии от него. Возмущение, возникшее на конце длинного упругого стержня, распространяется по нему без искажений (за исключением компонент очень высокой частоты) со скоростью упругой волны: $c = (E/\rho)^{1/2}$. Поэтому тензометрический датчик посередине стержня регистрирует усилие на конце стержня в функции времени, но с некоторой задержкой по времени. Кольский предложил для достижения высоких скоростей нагружения разместить два стержня с обеих сторон образца. Разрезной стержень Гопкинсона, или устройство Кольского для испытаний на сжатие, состоит из стержня-бойка, передающего стержня, опорного стержня и соответствующей регистрирующей аппаратуры (рис. 4.2.). Стержни устанавливаются в

тефлоновых или найлоновых втулках, обеспечивающих соосность стержней и не возмущающих волн напряжений, распространяющихся по образцу, размещенному между стержнями. Техника и теория метода много раз обсуждались в литературе (например, [10]).

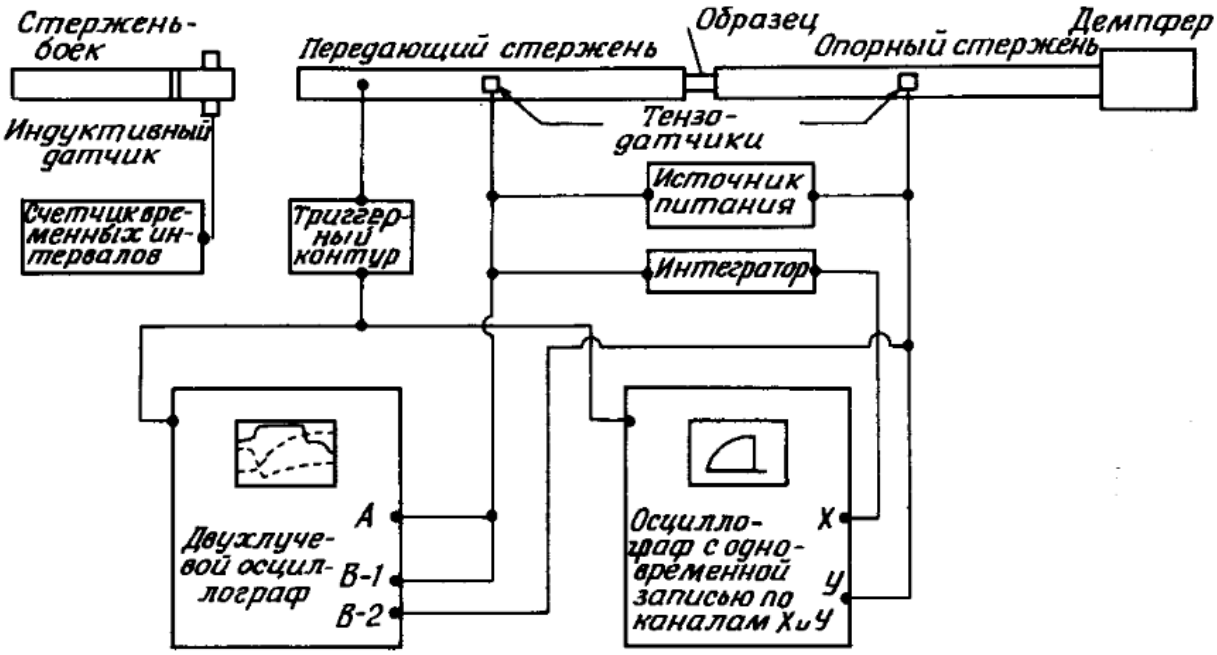



Рис. 4.2. Схема установки и измерительные приборы в эксперименте с разрезным стержнем Гопкинса.

Стержень-боек ускоряется либо с помощью сжатой пружины, либо с помощью небольшой газовой пушки. Существует несколько методов измерения скорости стержня-бойка. В одном из них в стержне-бойке нарезаются канавки с заданным шагом, и, когда боек пролетает сквозь катушку магнита, генерируются два импульса, поступающие затем в счетчик временных интервалов. В другом методе используют два фотоприемника и два источника света на заданном расстоянии друг от друга. При ударе стержня-бойка по передающему стержню в обоих стержнях возбуждаются импульсы сжатия постоянной амплитуды. Длительность импульса сжатия в передающем стержне равна двойному времени прохождения волны в бойке, а его величина пропорциональна скорости бойка. Когда импульс сжатия, распространяющийся по передающему стержню, достигает образца, часть его проходит в образец, а часть отражается вследствие разницы в площадях

сечений и акустических импедансах стержня и образца. Точная форма прошедшего и отраженного импульсов определяется величиной площади сечения и механическими характеристиками материала образца. По импульсам деформации, зарегистрированным тензометрическими датчиками на стержнях, можно определить деформирование концов стержней во времени. Следовательно, принцип стержня Гопкинсона базируется только на знании скорости распространения продольной волны, по которой определяется сдвиг импульсов во времени, и на предположении об отсутствии дисперсии упругих волн в длинных стержнях.

## 5. Измерение массовой скорости

Исследование нестационарных физико-химических процессов и экстремальных состояний вещества при интенсивном импульсном воздействии является одной из наиболее актуальных фундаментальных задач физики высоких плотностей энергии. Регистрируя различными методами динамической диагностики количественные и качественные параметры структуры и эволюции волн сжатия и разрежения, можно определить свойства исследуемого вещества. Анализ полей давления и скорости при ударно-волновом нагружении релаксирующих сред дает основу для определения кинетических закономерностей процессов упругопластического деформирования, разрушения, химических и фазовых превращений.

Первые измерение временного профиля массовой скорости были проведены Грэхеном в 1962 году [32] с помощью датчиков давления. В отличие от измерений давления, методы определения скорости вещества имеют первичный характер, так как не связаны с построением калибровочных зависимостей, поэтому от них следует ожидать более высокой точности. Из всех существующих на сегодняшний день методов непрерывной регистрации ударных профилей массовой скорости, таких как метод емкостного датчика, или магнитоэлектрический метод, наиболее универсальными являются бесконтактные дистанционные методы с использованием лазерного излучения. Так как при скорости движения отражающей поверхности ~ 100–1000 м/с доплеровский сдвиг частоты лазерного излучения видимого диапазона весьма мал (сдвиг длины волны зондирующего излучения ~ $10^{-4}$–$10^{-3}$ нм), то для его измерения возникает возможность использования оптических схем подобных двулучевым или многолучевым интерферометрам.

## 5.1. Интерферометр смещения

В 1965 году Баркер использовал интерферометр смещения для регистрации профиля массовой скорости [33]. На основе интерферометра Майкельсона.

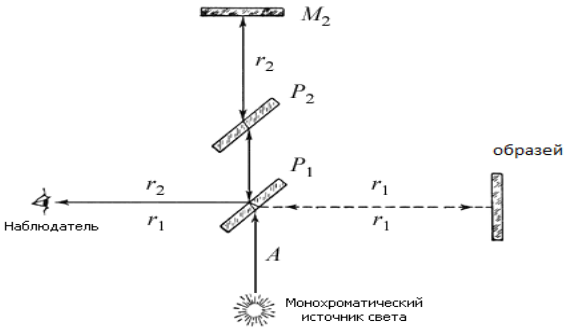



Рис. 5.1. Схема интерферометра Майкельсона.

Данные интерферометры получили название интерферометры смещения.

Главный принцип в интерференции опорного, не изменяемого по частоте луча, с лучом от образца, в котором под воздействием эффекта Доплера изменяется частота, от скорости поверхности.

Главным недостатком таких интерферометров является большие требования к полосе пропускания аппаратуры, что не дает, при нынешней ситуации в измерительной технике, использовать их при скоростях деформации больше 300 м/с.

## 5.2. Скоростной интерферометр VISAR

Одна из самых распространённых и активно развивающихся систем для проведения измерений массовой скорости является VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector). Появившийся в начале 70-х, VISAR претерпел множество модификаций, значительно повысивших его точность и надёжность [34-36].

Принцип работы диагностического комплекса состоит в следующем. Излучение одночастотного лазера фокусируется на поверхности исследуемого образца. После отражения, рассеянное лазерное излучение коллимируется оптической системой и направляется в двухлучевой

интерферометр. Вследствие симметрии оптической схемы интерферометра, пространственная когерентность анализируемого излучения не требуется. Необходимый интерференционный контраст достигается даже при работе с излучением, отраженным от рассеивающей, шероховатой поверхности. За счет введения в одно из плеч оптической линии задержки время двукратного прохождения света в этом плече больше, чем в противоположном. Поэтому при изменении скорости отражающей поверхности, интерферирующие на делительном зеркале волны из разных плеч интерферометра, отличаются по частоте. Изменение светового потока на выходе из интерферометра связано с изменением скорости отражающей поверхности гармонической зависимостью, подобной аппаратной функции традиционного двухлучевого интерферометра фазового сдвига. Для расширения динамического диапазона измерений и устранения нелинейной дифференциальной чувствительности, а также для надежной фиксации изменения знака ускорения при немонотонном изменении скорости поверхности в приборе использована система поляризационного кодирования, что обеспечило однородную дифференциальную чувствительность и широкий диапазон измерений скорости: 50–1000 м/с.

Однако наряду с достоинствами данного интерферометра у него есть недостатки. Данный метод не позволяет измерять только среднюю скорость частиц среды, являющуюся макроскопической характеристикой деформационного процесса.

## 5.3. Скоростной интерферометр

Интерферометр, способный фиксировать не только среднюю скорость частиц среды, был предложен Баркером в 1967 году.

Модифицированный Мещеряковым и Диваковым дифференциальный интерферометр представлен на рис. 5.2.

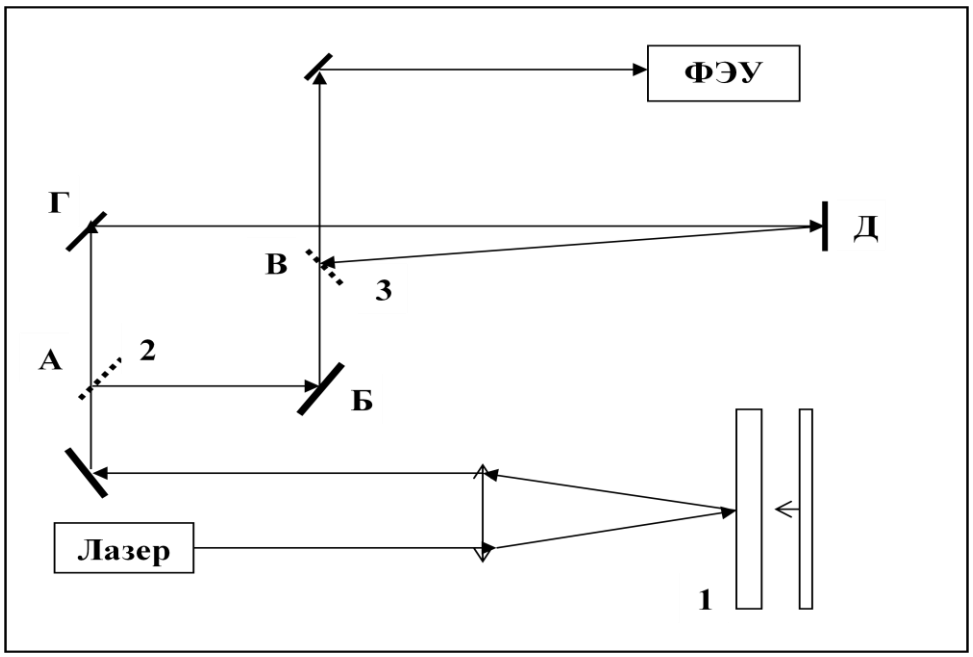



Рис.5.2. Схема одноканального дифференциального интерферометра.

Лазерный луч, отраженный от свободной поверхности мишени *1* делится на два луча с помощью полупрозрачного зеркала *2*. Эти лучи далее интерферируют на зеркале *3* после прохождения различных путей ***АБВ*** и ***АГДВ***. Разница в длине этих путей представляет собой плечо задержки скоростного интерферометра $l_d$. Если $w_o$ - частота лазерного излучения, падающего на мишень, свободная поверхность которой двигается со скоростью v*(t),* то частота отраженного от этой поверхности излучения, в соответствии с эффектом Доплера, равна:

$$w = w_0\left(1 + 2\frac{V}{C}\right) \qquad (1)$$

где *c* - это скорость света. Согласно Баркеру [34], скорость свободной поверхности v(t) связана с числом биений интерференционного сигнала N(t) и временем задержки сигнала в плече ***ILK*** интерферометра следующим соотношением:

$$V(t) = \left(\frac{\lambda_0}{2\tau_d}\right) \cdot N(t) \qquad (2)$$

Таким образом, последовательно подсчитывая число биений на определенном интервале времени, можно построить зависимость скорости свободной поверхности от времени, т.е. временной профиль скорости.

Анализ работы скоростного интерферометра в [34] предполагает, что мишень движется как единое целое, т.е. все частицы свободной поверхности в данный момент времени имеют одну и ту же скорость. В действительности, однако, скорости различных частиц в пределах поперечного сечения лазерного луча могут различаться, т.е., иметь некоторый разброс. В этом случае отраженное от свободной поверхности мишени излучение лазера теряет свою монохроматичность и может быть охарактеризовано некоторым спектром излучения $\Delta w$. Процесс отражения первичного монохроматичного лазерного излучения от свободной поверхности мишени можно представить как генерирование некоторой совокупности микролучей, каждый из которых взаимодействует с конкретной частицей поверхности мишени. В результате этого взаимодействия и вследствие того, что различные частицы имеют разные скорости, элементарные микролучи приобретают разные доплеровские сдвиги частоты. Это приводит к уменьшению степени монохроматичности результирующего излучения, что эквивалентно расширению его спектра. Известно, что если свет немонохроматичен и имеет непрерывный спектр, интенсивность излучения в пределах некоторого частотного интервала от $w$ до $w + dw$ - пропорциональна $dw$:

$$dI_0 = F(w)dw, \tag{3}$$

где F($w$) - это спектральная плотность излучения. После нормировки F($w$) получим:

$$dI_0 = I_0 \cdot f(w)dw, \tag{4}$$

где:

$$I_0 = \int F(w)dw \tag{5}$$

- суммарная плотность излучения по поперечному сечению лазерного луча и:

$$f(w) = \frac{F(w)}{\int F(w)dw} \tag{6}$$

Вследствие интерференционного процесса интенсивность излучения на выходе интерферометра изменяется в соответствии с выражением:

$$dI = \frac{1}{2} dI_0(1 + \cos(w \cdot \tau_d)) = \frac{I_0}{2} f(w) \cdot (1 + \cos(w \cdot \tau_\mathrm{d})\, dw), \tag{7}$$

где $\tau_d = \frac{\lambda_0}{c}$ - время задержки скоростного интерферометра. Полная интенсивность может быть записана в следующем виде:

$$I = \int \frac{I_0}{2} f(w)(1 + \cos(w \cdot \tau_d))dw \qquad (8)$$

Обычно спектр излучения сконцентрирован в окрестности некоторой центральной частоты $w$, соответствующей максимуму плотности излучения. Заменим в выражении (7) переменные интегрирования:

$$w = \boldsymbol{w} + w_* \qquad (9)$$

и учтем, что $\Delta w << w$. Тогда получим:

$$dI = \frac{I_0}{2} \Phi(w_*) \cdot (1 + \cos[(w_* \cdot \mathbf{w}) \cdot \tau_d])dw_*, \qquad (10)$$

где:

$$\Phi(w_*) = f(w_* + \boldsymbol{w}) \qquad (11)$$

Выражение (10) может быть преобразовано к виду:

$$I = \frac{I_0}{2}[1 + \mathrm{C} \cdot \cos(w \cdot \tau_d - S \cdot \sin(w \cdot \tau_d))], \qquad (12)$$

где:

$$\mathrm{C} = \Phi(w_*) \cdot \cos(w_* \cdot \tau_d)dw_* \qquad (13)$$

$$S = \Phi(w_*) \cdot \sin(w_* \cdot \tau_d)dw_* \qquad (14)$$

По определению, контрастность интерференционного сигнала равна:

$$K = {(I_{max} - I_{min})}/{(I_{max} + I_{min})} \qquad (15)$$

Из выражений (11) и (15) получим: $K = \sqrt{(C^2 + S^2)}$ (16)

Для дальнейшего анализа нужно задаться некоторой конкретной формой спектра излучения $\Phi(w_*)$. Для случая гауссовой формы спектра излучения:

$$\Phi(w_*) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\,(-w_*^2/2\sigma^2) \qquad (17)$$

$$\Phi(w_*) = \Phi(-w_*)$$

$$K = C = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} exp\,(-w_*^2/2\sigma^2) \cdot \cos(w_* \cdot \tau_d)dw_*$$

или:

$$K = exp\,(-\tau_d^2 \cdot \sigma^2)/2, \qquad (18)$$

где σ - это полуширина спектральной функции $\Phi(w)$. Учитывая, что:

$\boldsymbol{w} = w_0(1 + 2\,V/c)$ и $w = w_0(1 + 2\,u/c)$

получим: $$w_* = (4\pi/\lambda_0)(u - V) \quad (19)$$

$$\sigma = (2\pi/\lambda_0)D$$

Здесь u - средняя скорость частиц свободной поверхности мишени, $\lambda_0 = 2\pi c/w_o$ - длина волны лазерного излучения, $D$ - ширина распределения по скоростям.

Искомая связь между контрастностью интерференционного сигнала K и шириной распределения частиц по скоростям $D$ может быть получена при использовании выражений (18) и (19):

$$K = exp[-\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi^2 D^2}{U_{int}^2}], \quad (20)$$

где $U_{int} = \lambda_o/2\tau_d$ - постоянная интерферометра, зависящая от длины волны лазерного излучения и времени задержки луча в плече задержки. Тогда интенсивность света на выходе интерферометра может быть записана в следующем виде:

$$I(t) = \frac{I_0}{2}\left(1 + K\cos\left[2\pi\frac{u(t)}{U_{int}} + \varphi_0\right]\right), \quad (21)$$

где $\varphi_o = w_o \tau_d$ - начальная фаза интерференционного сигнала I(t). Из выражений (20) и (21) видно, что число биений интерференционного сигнала определяется макроскопической скоростью свободной поверхности мишени u(t), в то время как амплитуда этих биений зависит от микроскопической характеристики движения частиц $D$(t). Обе эти характеристики могут быть определены за один акт ударного нагружения, если зарегистрирована точная форма интерференционного сигнала.

## 6. Мезо - макро энергообмен

Специфика динамического деформирования заключается в том, что в реальном масштабе времени имеют дело не со статистически распределенными величинами смещений, пор и трещин, а с распределением частиц деформируемой среды по скоростям. Это распределение в первом приближении количественно характеризуется двумя статистическими моментами функции распределения по скоростям - средней массовой скоростью u(t) и дисперсией скорости $D^2(t)$. На разных масштабных уровнях, как само распределение частиц по скоростям, так и его статистические моменты могут иметь разное значение, а времена релаксации функции распределения к равновесному значению могут отличаться на порядок

Применяемая в настоящих экспериментах методика контролирует протекание динамических процессах только на двух соседних масштабных уровнях – мезоуровне и макроуровне. Количественной характеристикой процессов на мезоуровне является дисперсия массовой скорости D(t), в то время как на макроуровне отклик среды на ударное нагружение характеризуется профилем средней скорости $u_{fs}(t)$. Многочисленные эксперименты показывают, что для таких неравновесных систем, как динамически деформируемая гетерогенная среда, дефект средней скорости и дисперсия скорости не являются независимыми величинами. Между дефектом средней скорости Δu и дисперсией $D^2$ выполняется следующее соотношение [38]:

$$\Delta U = \frac{1}{2}\frac{dD^2}{dU} \qquad (22)$$

Это выражение можно представить в виде:

$$\Delta U = D\,\frac{dD/dt}{dU/dt} \qquad (23)$$

В том случае, если выполняется равенство

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dU}{dt} \qquad (24)$$

т.е. если скорость изменения вариации массовой скорости (корня квадратного из дисперсии) равна скорости изменения средней скорости частиц среды, то дефект скорости равняется самой вариации скорости:

$$\Delta U = D \qquad (25)$$

В случае одноосной деформации соотношение (23) может быть записано в терминах деформации и скорости деформации, если правую и левую части разделить на скорость распространения волны $C_0$:

$$\frac{\Delta U}{C_0} = \frac{D}{C_0}\frac{\dot{D}/C_0}{\dot{U}/C_0} \qquad (26)$$

или

$$\Delta\varepsilon_{mc} = \varepsilon_D \frac{\dot{\varepsilon}_D}{\dot{\varepsilon}_{mc}} \qquad (27)$$

Здесь $\Delta\varepsilon_{mc}$ - это та доля макроскопической деформации, которая является следствием энергообмена между мезо- и макроуровнями, $\varepsilon_D$ и $\dot{\varepsilon_D}$ - это локальная деформация (на мезоуровне) и скорость деформации на мезоуровне, соответственно, $\varepsilon_{mc}$ и $\dot{\varepsilon_{mc}}$ - деформация и скорость деформации на макроуровне. При условии

$$\dot{\varepsilon_{mc}} = \dot{\varepsilon_D} \qquad (28)$$

т.е. когда скорость деформации на мезоуровне равна скорости деформации на макроуровне, все изменение деформации на макроуровне, как результат мезо-макро энергообмена, определяется величиной деформации на мезоуровне:

$$\Delta\varepsilon_{mc} = \varepsilon_D \qquad (29)$$

В ударных экспериментах по одноосной деформации непосредственно измеряемыми величинами являются не скорость деформации, а скорость свободной поверхности Ufs, дефект скорости ΔU и вариация скорости D, так что равенство (25) полностью контролируемо. Вместе с тем, физический смысл протекающих при этом процессов легче понять из выражения (28), которое является условием равенства локальной и макроскопической скоростей деформации. Выражение (29) отражает равновесный режим мезо-макро энергообмена, при котором изменение энергии и импульса в процессе

динамического деформирования, определяется деформацией мезоуровня. В этом случае деформация на мезоуровне полностью определяется локальными смещениями, которые вызываются пульсациями массовой скорости. Наличие дисперсии массовой скорости свидетельствует о протекании релаксационных процессов на мезоуровне, последействием которых является деформация $\varepsilon_D$. Как показывает эксперимент, именно в условиях равновесного режима (28)-(29) реализуется максимальная для данного материала динамическая прочность [39].

Соотношение (22), связывающее дефект скорости и дисперсию, отражает текущий характер мезо-макро энергообмена. С другой стороны, смещения среды, вызываемые пульсациями скорости, имеют вполне конечные временной и пространственный масштабы. В случае динамического деформирования это означает, что на раскачку пульсаций скорости требуется некоторое время, которое определяется нелокальным характером процессов пластического деформирования. В такой ситуации, по аналогии с элементарным актом разрушения в механике разрушения, можно провести осреднение процесса мезо-макро энергообмена в следующем виде:

$$\int_{t-\tau}^{t}\left(\frac{1}{2}\frac{\partial D^2}{\partial U}\right)dS \leq \Delta U\tau, \qquad (30)$$

где $\tau$ - это время осреднения, которое может рассматриваться как «инкубационное время» процесса мезо- макро энергообмена. Величина в правой части – это среднее смещение $\Delta u\tau$, которое создается пульсациями с дисперсией $D^2$ за время $\tau$. В случае равновесного режима энергообмена, когда выполняется соотношение (24), критерий (30) преобразуется к виду:

$$\int_{t-\tau}^{t} D(s)ds \leq \Delta U_{\text{кр}}\tau, \qquad (31)$$

где величина $\Delta U_{\text{кр}}$ - это критическое значение дефекта скорости, соответствующее элементарному смещению частиц среды $\Delta U_{\text{кр}}\tau$. Умножив обе части соотношения (25) на акустический импеданс деформируемой среды $\rho C_0$ , получим:

$$\rho C_0 \int_{t-\tau}^{t} D(s)ds \leq \Delta\sigma\tau, \qquad (32)$$

где правая часть

$$\Delta\sigma\tau = \rho C_0 \Delta U \tau \qquad (33)$$

- это количество движения, передаваемое на деформируемому материалу в течение инкубационного времени.

Наличие распределения частиц по скоростям на мезоуровне еще не означает образование дефектов структуры и зарождение несплошностей мезоскопического масштаба. В соответствии с выражением (22), во время первой половины пластического фронта идет перекачка импульса с макроуровня на мезоуровень (амплитуда пульсаций скорости и, соответственно дисперсия, возрастают), в то время как во второй половине фронта протекает обратный процесс – перекачка импульса с мезоуровня на мкроуровень. При этом, если максимальное значение скорости свободной поверхности на плато импульса сжатия равно скорости ударника при симметричном соударении (когда акустический импеданс ударника равен акустическому импедансу мишени $\rho_{\text{уд}} C_{\text{уд}} = \rho_{\text{м}} C_{\text{м}}$, крупномасштабные пульсации скорости не отбирают импульс и энергию). Аналогичная ситуация, как известно, наблюдается в турбулентной жидкости, где крупномасштабные пульсации обратимы и участвуют только в переносе энергии [40].

Пульсации скорости, количественно характеризуемые дисперсией скорости частиц, могут трансформироваться в реальные дефекты структуры только при выполнении определенных условий. Порог такой трансформации определяется условием [38]:

$$\left(\frac{D}{U}\frac{\dot{D}}{\dot{U}}\right) \geq 1 \qquad (34)$$

Это условие утверждает, что переход материала в структурно-неустойчивое состояние происходит тогда, когда скорость изменения вариации скорости выше скорости изменения средней массовой скорости частиц среды, т.е. dD/dt>du/dt. При этом отношение $D/u$ играет роль весового коэффициента. После динамического предела текучести,

характеризуемого упругим пределом Гюгонио, соотношение (34) является вторым важным порогом динамического поведения материала, определяющим его структурную устойчивость при заданной скорости деформации.

## 7. Методика эксперимента

Методика предназначена для определения следующих динамических характеристик материала:

1. Динамический предел текучести,

2. Порог структурной неустойчивости на ударное сжатие,

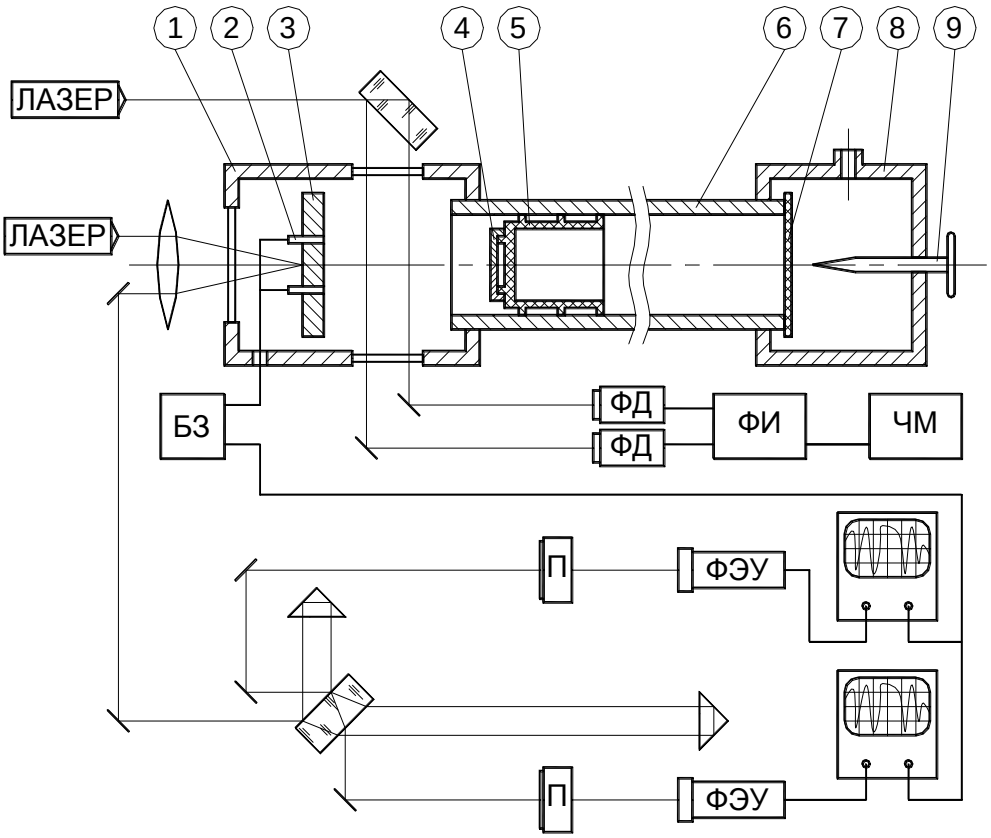
3. Прочности материала на динамическое растяжение (тыльный откол)

4. Дефекта массовой скорости как количественной характеристики энергопоглощающей способности материала,

5. Динамических диаграмм «напряжение-деформация» конструкционных материалов в диапазоне скоростей деформации $10^3 \div 10^7$ сек$^{-1}$.

Методика ударных испытаний включает собственно метод динамического нагружения и метод регистрации механических характеристик динамически деформируемой среды.

Ударное нагружение образцов осуществляется с помощью 37 мм легкогазовой метательной установки (пневмокопра). Функциональная схема установки вместе с измерительным трактом представлена на рис. 8.1.




**1** – вакуумная камера;
**2** - концевые контакты запуска аппаратуры;
**3** – мишень;
**4** – ударник;
**5** – направляющий поддон ударника;
**6** – ствол пневмокопра;
**7** – диафрагма;
**8** - камера высокого давления;
**9** - устройство прорыва мембраны.

**ФД** – фотодетекторы;
**ФИ** – устройство формирования импульса;
**ЧМ** – измеритель временных интервалов;
**П** – поляроид;
**БЗ** - блок задержки сигнала.

Рис. 8.1. Функциональная схема установки и измерительного тракта**.**

Образец (3) в виде шайбы диаметром 52 мм и толщиной 2÷15 мм устанавливается на выходе ствола (6) внутри вакуумной камеры (1). Снаряд состоит из металлического ударника и направляющего стаканчика, изготовленного из полиэтилена низкого давления или поликарбоната (см. рис.8.2).

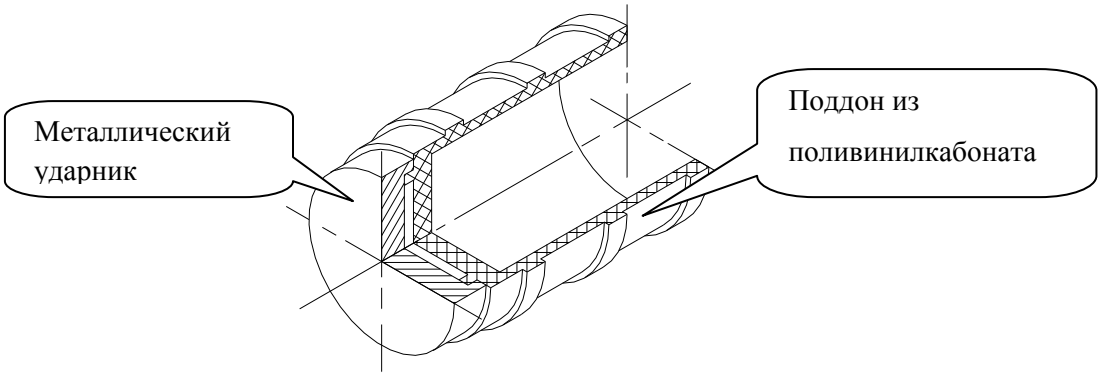



Рис. 8.2. Ударник с поддоном.

Направляющий стаканчик имеет три пояска, обеспечивающих плотное прилегание к стенкам ствола с целью исключения проникания толкающих его газов в область перед снарядом. В камере высокого давления (8) создается давление, необходимое для прорыва диафрагмы (7). Диафрагма смонтирована непосредственно перед снарядом, и ее толщина подбирается, исходя из требуемой скорости снаряда. Имеется калибровочная кривая зависимости скорости ударника от давления газа в камере высокого давления. Скорость ударника определяется в каждом акте ударного нагружения путем измерения времени пролета фиксированного расстояния между двумя лазерными лучами, ориентированными перпендикулярно направлению полета снаряда. Данный метод обеспечивает точность измерения скорости снаряда не ниже 0,5 %. Вакуумная камера имеет окно для пропускания лазерного луча интерферометра на свободную поверхность мишени. С наружной стороны камеры смонтирован длиннофокусный объектив для фокусировки лазерного луча интерферометра на тыльной поверхности образца. Подготовка установки к работе осуществляется в следующей последовательности. Исследуемый образец (мишень) 3 устанавливается в защитной вакуумной камере 1. К образцу крепятся контакты 2 устройства запуска регистрирующей аппаратуры. Снаряд, состоящий из ударника 4, закрепленного на полиэтиленовом поддоне 5, помещается в ствол 6. После этого осуществляется откачка ствола до вакуума $10^{-2}$ Торр для того, чтобы исключить возникновение воздушной подушки

перед летящим снарядом. Разгон снаряда начинается после прорыва диафрагмы 7, отделяющей ствол от камеры высокого давления 8, с помощью устройства прорыва 9.

Снаряд, пролетев ствол установки, соударяется с образцом, перед этим последовательно пересекая два лазерных луча, проходящих внутрь защитной вакуумной камеры через боковые окна. В момент прерывания лучей в фотодиодах ФД возникают разнесенные во времени сигналы, которые после прохождения формирователя импульсов ФИ поступают в частотомер ЧМ, измеряющий временной интервал между этими импульсами, что позволяет вычислить скорость полета снаряда. При соударении ударника с образцом происходит замыкание контактов устройства запуска регистрирующей аппаратуры. Сигнал с контактов подается на блок задержки запускающего импульса БЗ, который, в свою очередь, после определенной задержки посылает сигнал запуска на осциллографы. Задержка сигнала производится с учетом времени прохождения ударной волны через образец. Для регистрации параметров ударных волн с целью для определения динамического предела текучести и построения динамической диаграммы «напряжение-деформация» материала используется доплеровский измеритель скорости – двухканальный лазерный дифференциальный интерферометр. На двух выходах интерферометра с помощью высокоскоростного запоминающего осциллографа регистрируется временной профиль скорости свободной поверхности мишени. Принцип работы интерферометра и регистрации волновых профилей скорости свободной поверхности детально изложен в [34, 36].

Расчет величин напряжения σ, деформации ε и скорости деформации $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ вдоль направления распространения волны определяются из следующих соотношений:

$$\sigma = \frac{1}{2}\rho(V_{fs}^{*}C_l + \left(C_p - C_l\right)) \qquad (47)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\left(\frac{V_{HEL}}{C_l} + \frac{V_{fs}^* - V_{HEL}}{C_p}\right) \quad (48)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\varepsilon}{t_f} \quad (49)$$

Здесь $V_{HEL}$ и $V_{fs}^*$ - значения скорости свободной поверхности на упругом предвестнике и на плато импульса сжатия, соответственно, $C_l$ - продольная скорость звука, $C_p$ – скорость пластического фронта, $\rho$ – плотность материала мишени, $t_f$ - длительность переднего фронта импульса сжатия. Скорость пластического фронта определяется из временного профиля скорости свободной поверхности при известной скорости упругих волн по формуле:

$$C_p = \frac{h_M}{\frac{h_M}{C_l} - \Delta t}\ , \quad (50)$$

где $\Delta t$ - задержка пластического фронта относительно упругого предвестника. При этом отсчет времени осуществляется между серединой упругого предвестника и серединой пластического фронта [44]. В качестве характеристик динамического отклика взяты следующие величины, определяемые в процессе ударного нагружения:

а) динамический предел текучести, $Y_{дин}$, б) откольная прочность σотк, в) порог структурного перехода, инициированного ударным нагружением $U_{пор}$, г) дефект массовой скорости на плато импульса сжатия $U_{деф}$. Определение перечисленных характеристик из временного профиля скорости свободной поверхности поясняется на Рис.7.3, где представлен один из профилей для мишени из стали 04Х20Г11Н6М2АФБ, зарегистрированный с помощью скоростного интерферометра, где представлен временной профиль скорости плоской мишени из азотосодержащей стали, нагруженной в условиях одноосного ударного нагружения при скорости ударника 308 м/с.

Отдельные участки профиля соответствуют разным временным стадиям динамического отклика материала на ударное нагружение. Участок ОА определяет так называемый упругий предел Гюгонио $U_{HEL}$, который связан с нормальным напряжением на упругом предвестнике $\sigma_{HEL}$ соотношением:

$$\sigma_{HEL} = \frac{1}{2}\rho C_l U_{HEL} \qquad (51)$$

В свою очередь, динамический предел текучести $Y_{дин}$ определяется соотношением:

$$Y_{дин} = \frac{1-\nu}{1-2\nu}\sigma_{HEL} \quad , \qquad (52)$$

где ν - коэффициент Пуассона. Участок временного профиля АВ характеризует пластический фронт упруго - пластической волны. Его положение относительно упругого фронта ОА зависит от скорости ударного нагружения, а форма и наклон определяются релаксационными и вязкими свойствами материала, При этом точка В определяет так называемый порог структурной неустойчивости $U_{пор}$. инициированной ударным нагружением материала. Порог структурного перехода далее определяется из зависимости порога структурной неустойчивости от скорости ударника как точка излома этой зависимости в координатах $U_{сн}$ - $U_{уд}$.

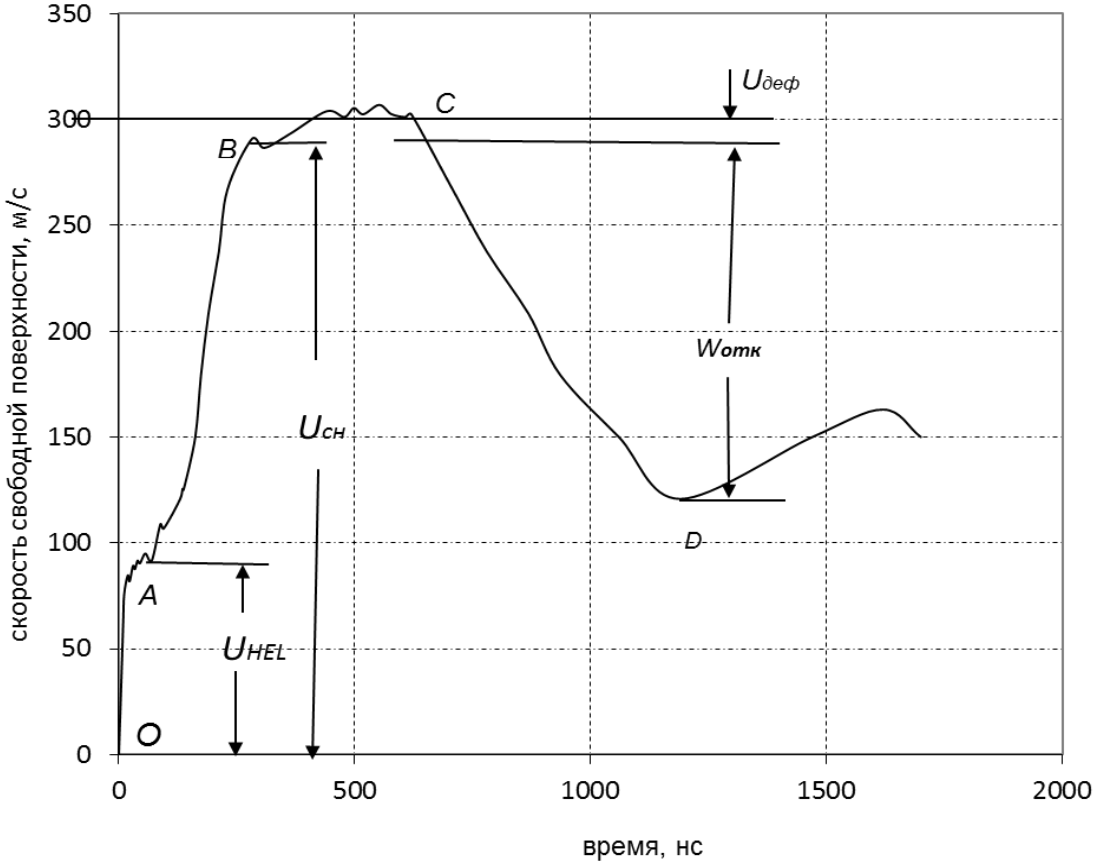



Рис.8.3. Временной профиль скорости свободной поверхности мишени азотосодержащей стали, нагруженной при скорости ударника 308 м/с.

Независимое измерение скорости ударника позволяет определить дефект массовой скорости как разность между скоростью ударника и максимальным значением скорости свободной поверхности на плато импульса сжатия:

$$U_{деф} = U_{уд} - U_{fs}^{max} \qquad (53)$$

Наконец, откольная прочность определяется по величине разности между максимальным значением скорости свободной поверхности и первым минимумом на заднем фронте импульса сжатия (отрезок CD). В акустическом приближении откольная прочность рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_{отк} = \frac{1}{2}\rho C_0 W, \qquad (54)$$

где $C_0$ - гидростатическая скорость.

## 8. Эксперимент

Известно, что как при квазистатических условиях нагружения, так и при ударном нагружении, окончательному разрушению твердого тела предшествует стадия скрытого разрушения. Интегральной макроскопической характеристикой скрытой стадии разрушения, используемой в теории, является так называемый параметр «сплошности» [38] или «повреждаемости» [39]. Этот параметр характеризует процесс постепенной деградации материала и не является критериальной характеристикой процесса разрушения. Вместе с тем, отсутствие критериальных (пороговых) соотношений для параметра повреждаемости делает теоретические подходы неконструктивными в части описания реального поведения материла при ударном нагружении. Под «пороговыми» понимаются такие соотношения, при выполнении которых качественно изменяется макроскопический отклик материала на ударное нагружение и одновременно изменяется характер протекания элементарных процессов на микроуровне.

С целью определения пороговых характеристик динамического деформирования проведены ударные испытания алюминиевого сплава Д - 16 при скоростях деформации, соответствующих диапазону скоростей ударника 370 и 451 м/с.

Условие (34) теоретически получено из анализа распространения одномерной волны в двухуровневой упруго-пластической среде [42] и экспериментально подтверждено для сложно-легированных сталей [42, 43]. В настоящей работе проверена справедливость соотношения (34) для исследуемого алюминиевого сплава Д-16. С этой целью рассмотрены два временных профиля скорости свободной поверхности $u_{fs}$(t). Первый профиль (рис. 9.1) полученный при скорости ударника $U_{уд}$= 370 м/с, соответствует такой скорости деформации, когда материал еще не переходит в структурно-неустойчивое состояние. Второй временной профиль (рис. 9.2), полученный при скорости ударника $U_{уд}$ = 451 м/с, соответствует скорости деформации, для которой характерна большая величина дефекта скорости.

Расшифрованные временные профили скорости свободной поверхности $u_{fs}$(t) вместе с профилями вариации скорости $D$(t) представлены на рис.9.3. и 9.4.

Для профиля скорости свободной поверхности $u_{fs}$(t), соответствующего скорости ударника 370 м/с, характерно плавное нарастание средней скорости от его значения на упругом предвестнике до его максимального значения на плато импульса сжатия. При этом вариация скорости достигает максимума в середине пластического фронта. Для применения критерия (34) воспользуемся наиболее крутым участком профиля вариации скорости *AB*, т.е. там, где скорость ее изменения *dD/dt* максимальна (рис.9.3). На профиле средней скорости это соответствует участку *A'B'* Для участков *AB* и *A'B'* имеем:

$D$ = 36,5 м/с; $u$ = 250 м/с; $dD/dt$ = 0,5 ·$10^{11}$ см/с; $du/dt$ = 2 ·$10^{11}$ см/с.

Подставляя эти данные в выражение (34), получим $\left(\frac{D}{U}\frac{\dot{D}}{\dot{U}}\right) < 1$, т.е. критерий перехода в структурно-неустойчивое состояние не выполняется.

Проведем аналогичные расчеты для профилей скорости свободой поверхности и вариации скорости, представленных на рис. 9.4 (скорость ударника 451 м/с). Для участков *DE* и *D'E'*, соответствующих наибольшей скорости изменения вариации и средней скорости, соответственно, имеем следующий набор данных:

$D$ = 87,3·$10^2$ см/с; $u$ = 295·$10^2$ см/с так что их отношение равно $\frac{D}{U} = \frac{87,3}{295} = 0,296$ Одновременно на участке *DE* имеет место резкое нарастание дисперсии – вариация скорости изменяется от 49, 2 м/с в точке *D* до 87,3 м/с в точке *E*. Таким образом, градиент вариации скорости на отрезке *DE* достигает величины $dD$ = 87,3 - 49,3 = 38 м/с, в то время как градиент массовой скорости на этом же отрезке равен 0,87 м/с, откуда $\frac{D}{U} = \frac{38}{0,87} = 43,7$. Подстановка в выражение (34) дает $\left(\frac{D}{U}\frac{\dot{D}}{\dot{U}}\right) = 0,296 \cdot 43,7 = 12,9$. В

соответствии с критерием (34), при скорости ударника $U_{уд}$ = 451 м/с материал переходит в структурно-неустойчивое состояние.

Как это видно из рис. 9.4, при скорости ударника 451 м/с наблюдается отчетливый срыв биений интерференционного сигнала, которому соответствует резкое увеличение дефекта скорости.

На основании экспериментальных данных и вышеприведенного анализа можно заключить, что ударно-волновое поведение сплава Д-16 в плоских волнах нагрузки характеризуется следующими основными признаками.

1) Обратимые флюктуации массовой скорости мезоскопического масштаба, количественной характеристикой которых является дисперсия массовой скорости, имеют место только в пределах пластического фронта волны сжатия.

2) При некоторой пороговой величине скорости деформации на пластическом фронте происходит ***структурный переход***, приводящий к резкому увеличению дефекта скорости.

Для выяснения типа структурного перехода проведены микроструктурные и исследования образцов в различных диапазонах скоростей деформации.

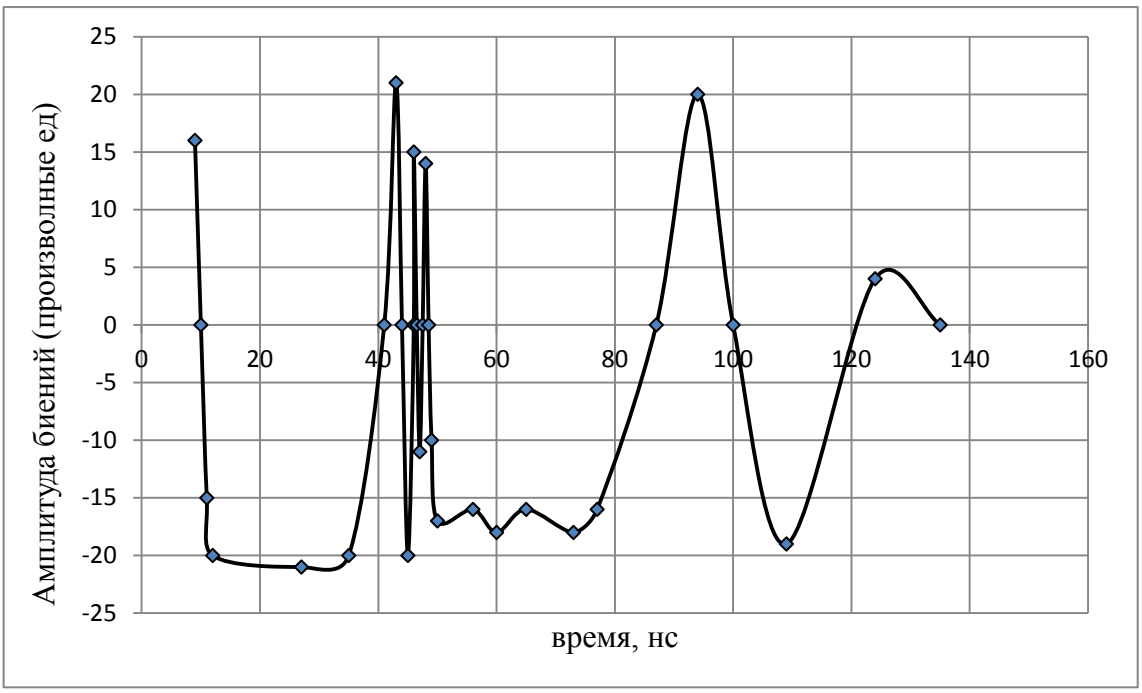



Рис. 9.1. Интерферограмма профиля скорости свободной поверхности в алюминии Д16 при скорости ударника 370 м/с

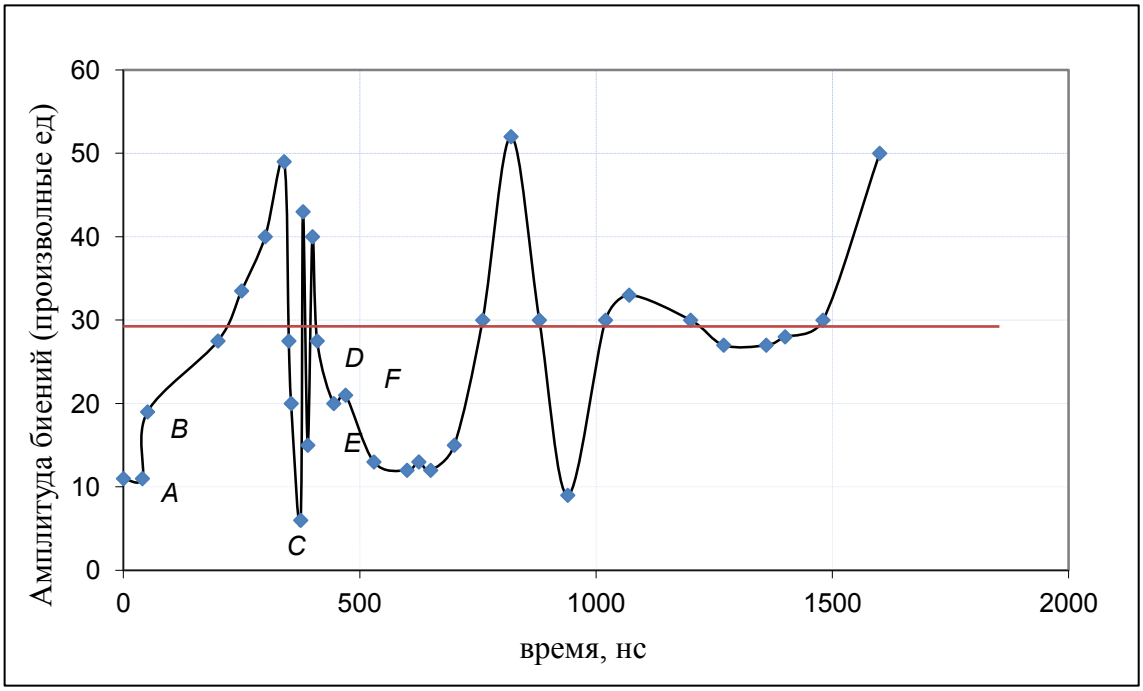



Рис. 9.2. Интерферограмма профиля скорости свободной поверхности в алюминии Д16 при скорости ударника 451 м/с

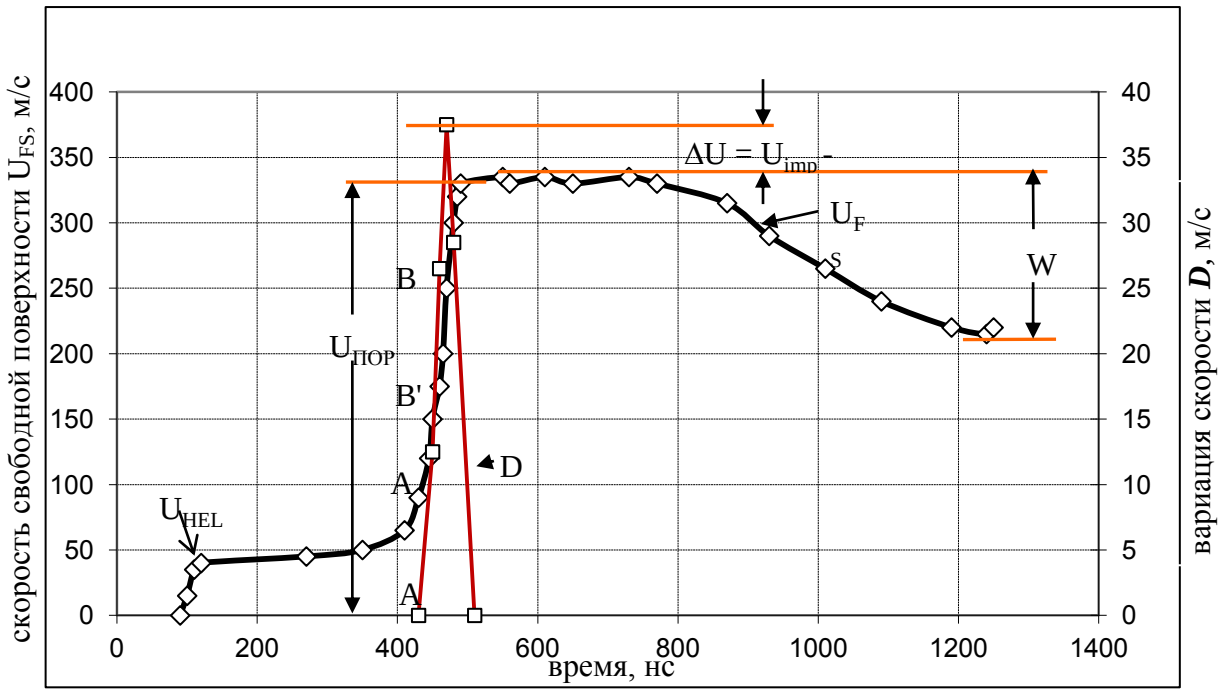



Рис. 9.3. Профиль скорости свободной поверхности в алюминии Д-16 при скорости ударника 370 м/с

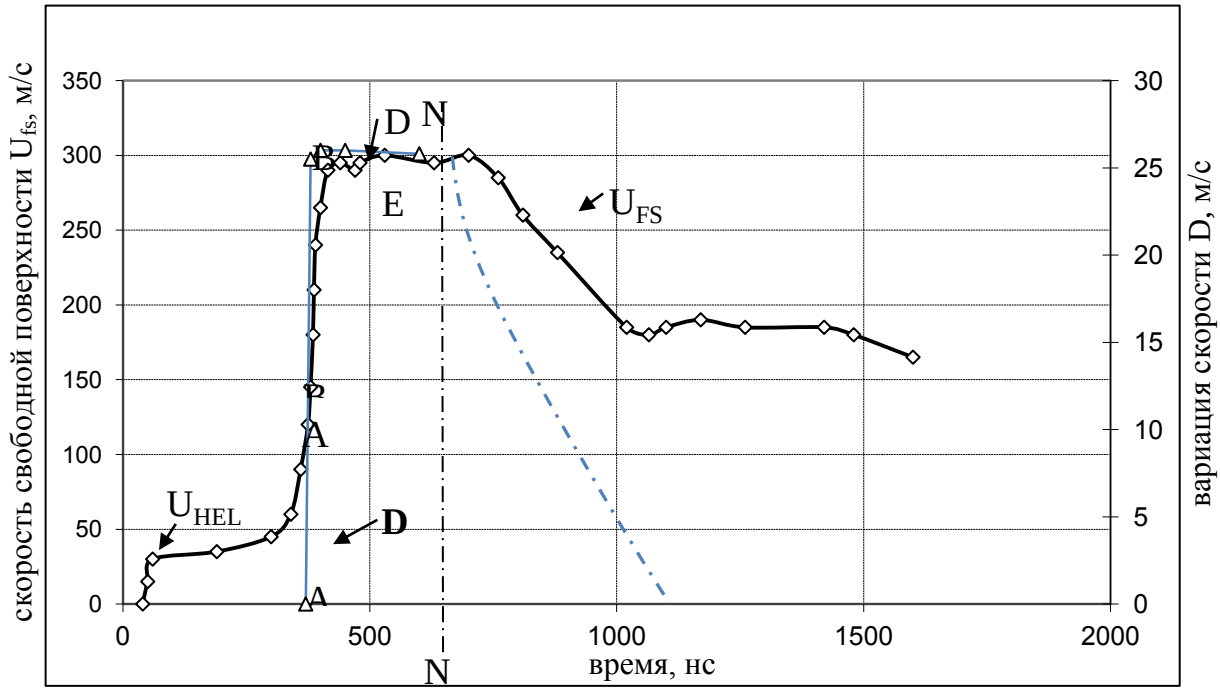



Рис. 9.4. Профиль скорости свободной поверхности в алюминии Д-16 при скорости ударника 451 м/с

## 9. Расчет динамических характеристик

Характеристики алюминиевого сплава Д-16:

$$\rho = 2{,}746\,\frac{\text{г}}{\text{см}^3};\ C_l = 6{,}396 \cdot 10^5\,\frac{\text{см}}{\text{сек}};\ C_0 = 5{,}37 \cdot 10^5\,\frac{\text{см}}{\text{сек}};\ \nu = 0{,}33.$$

$\boldsymbol{W} \approx 1{,}2 \cdot 10^4\,\frac{\text{см}}{\text{сек}}$;

$\boldsymbol{\sigma_{HEL}} = \frac{1}{2}\rho C_l U_{HEL} = \frac{1}{2} \cdot 2{,}746 \cdot 6{,}396 \cdot 10^5 \cdot 0{,}3 \cdot 10^4 = 2{,}26 \cdot 10^9\,\frac{\text{г}}{\text{см}\cdot\text{сек}^2} =$ 0,263 ГПа;

$\boldsymbol{Y}_{\text{дин}} = \frac{1-\nu}{1-2\nu}\sigma_{HEL} = \frac{1-0{,}33}{1-2\cdot 0{,}33} \cdot 2{,}26 \cdot 10^9 = 4{,}45 \cdot 10^9 = 0{,}445$ ГПа;

$\boldsymbol{\sigma}_{\text{отк}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_0 \cdot W = \frac{1}{2} \cdot 2{,}746 \cdot 5{,}37 \cdot 10^5 \cdot 1{,}2 \cdot 10^4 = 8{,}85 \cdot 10^9\,\frac{\text{г}}{\text{см}\cdot\text{сек}^2} =$ 0,885 ГПа.

**Скорость ударника 370 м/с:**

$\boldsymbol{U}_{\text{деф}} = U_{\text{уд}} - U_{fs}^{max} = 370 - 335 = 35\,\frac{\text{м}}{\text{сек}}$;

**Скорость ударника 451 м/с:**

$\boldsymbol{U}_{\text{деф}} = U_{\text{уд}} - U_{fs}^{max} = 451 - 300 = 151\,\frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

## Выводы

Проведенные экспериментальные исследования алюминиевого сплава Д-16 показывают, что в зависимости от скорости деформации в ударной волне могут реализоваться два различных режима динамического деформирования.

Первый режим, так называемый "допороговый режим динамического деформирования" реализуется в том случае, когда скорость изменения вариации массовой скорости в ударной волне ниже скорости изменения средней скорости (ускорения).

Второй режим, наоборот, реализуется при условии, что скорость изменения вариации массовой скорости выше массового ускорения.

Указанные выводы подтверждаются аналитической обработкой полученных в эксперименте временных профилей массовой скорости и вариации скорости для двух ударных нагружений мишеней из сплава Д-16: 370 м/с и 451 м/с.

## Приложение. Безопасность жизнедеятельности

Как известно, при работе с компьютером человек подвергается воздействию ряда опасных и вредных производственных факторов: ВЧ-электромагнитных полей, инфракрасного и ионизирующего излучений, шума и вибрации, статического электричества. Кроме всего вышеперечисленного, работа с компьютером характеризуется значительным умственным напряжением и нервно-эмоциональной нагрузкой операторов, высокой напряженностью зрительной работы и достаточно большой нагрузкой на мышцы рук при работе с клавиатурой ПК. Большое значение имеет рациональная конструкция и расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной рабочей позы человека-оператора ПК.

Организация работы должна проводиться в этом случае согласно СНиП 2.2.2/2.41340-03.

### Параметры микроклимата

Параметры микроклимата могут меняться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата – создание оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой.

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения.

Объем помещений, в которых размещены работники вычислительных центров, не должен быть меньше 19,5 м3/человека с учетом максимального

числа одновременно работающих в смену. Нормы микроклимата подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры, приведены в таблицах 1 и 2:

Таблица 1 Параметры микроклимата для помещений, где установлены компьютеры

| Период года | Параметр микроклимата | Величина |
|---|---|---|
| Холодный | Температура воздуха в помещении<br>Относительная влажность<br>Скорость движения воздуха | 22…24 °С<br>40…60 %<br>до 0,1 м/с |
| Теплый | Температура воздуха в помещении<br>Относительная влажность<br>Скорость движения воздуха | 23…25 °С<br>40…60 %<br>0,1…0,2 м/с |

Таблица 2 Нормы подачи свежего воздуха в помещения с ПК

| Характеристика помещения (объем помещения, в $м^3$ на человека) | Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, $м^3$ на человека/час |
|---|---|
| До 20<br>20…40<br>Более 40 | Не менее 30<br>Не менее 20<br>Естественная вентиляция |

Для обеспечения комфортных условий могут быть использованы как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, современная отопительная система) [45].

**Освещение**

Остановимся подробнее на недостаточной освещенности рабочей зоны помещения, где установлены ПЭВМ. Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказы-

вая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего. Все эти причины могут привести к несчастному случаю или профзаболеваниям, поэтому столь важен правильный расчет освещенности.

Существует три вида освещения - естественное, искусственное и совмещенное. Рассмотрим подробнее данную классификацию.

1). Естественное освещение - освещение помещений дневным светом, проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях помещений. Естественное освещение характеризуется тем, что меняется в широких пределах в зависимости от времени дня, времени года, характера области и ряда других факторов.

2). Искусственное освещение применяется при работе в темное время суток и днем, когда не удается обеспечить нормированные значения коэффициента естественного освещения (пасмурная погода, короткий световой день).

3). Совмещенным называется освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным.

Искусственное освещение подразделяется на рабочее, аварийное, эвакуационное, охранное. Рабочее освещение, в свою очередь, может быть общим или комбинированным. Общее - освещение, при котором светильники размещаются в верхней зоне помещения равномерно или применительно к расположению оборудования. Комбинированное - освещение, при котором к общему освещению добавляется местное [46].

## Шум и вибрация

Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека, вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Длительное воздействие интенсивного шума (выше 80 дБ) на слух человека приводит к его частичной или полной потере.

Ниже, в таблице 3, указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 3 Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах.

| Категория напряженности труда | Категория тяжести труда | | | |
|---|---|---|---|---|
| | I. Легкая | II. Средняя | III. Тяжелая | IV. Очень тяжелая |
| *I. Мало напряженный* | 80 | 80 | 75 | 75 |
| *II. Умеренно напряженный* | 70 | 70 | 65 | 65 |
| *III. Напряженный* | 60 | 60 | - | - |
| *IV. Очень напряженный* | 50 | 50 | - | - |

Уровень шума на рабочем месте математиков-программистов и операторов видеоматериалов не должен превышать 50 дБ, а в вычислительных залах – 65 дБ. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы

звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях вычислительных центров может быть снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы [47].

**Электромагнитное и ионизирующее излучения**

Большинство ученых считают, что как кратковременное, так и длительное воздействие всех видов излучения от экрана монитора не опасно для здоровья персонала, обслуживающего компьютеры. Однако исчерпывающих данных относительно опасности воздействия излучения от мониторов на работающих с компьютерами не существует и исследования в этом направлении продолжаются.

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера представлены в таблице 4.

Максимальный уровень рентгеновского излучения на рабочем месте оператора компьютера обычно не превышает 10 мкбэр/ч, а интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучений от экрана монитора лежит в пределах 10…100 мВт/м2.

Таблица 4 Допустимые значения параметров неионизирующих ЭМ-излучений (в соответствии с СанПиН 2.2.2.542-96)

| Наименование параметра | Допустимые |
|---|---|
| Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50см от поверхности видеомонитора | 10 В/м |
| Напряженность магнитной составляющей электромагнитного | 0,3 А/м |
| Напряженность электростатического поля не должна превышать: для взрослых пользователей<br>для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений | 20 кВ/м<br>15 кВ/м |

Для снижения воздействия этих видов излучения рекомендуется применять мониторы с пониженным уровнем излучения (ТСО-95 и выше); устанавливать защитные экраны, а также соблюдать регламентированные режимы труда и отдыха, описанные выше [48].

## Список литературы

[1] Lindholm U. S., in Techniques in Metals Research, R. F. Bunshah (Ed.), Vol. 5, pt 1, Interscience, N.Y., 1971.

[2] Taylor G.I, Proc. Roy. Soc, London A, 194, 289 (1948).

[3] Wiffin A.C., Proc. Roy. Soc, London A, 194, 300 (1948).

[4] Wilkins M.L, Guinan M.W, J. Appl. Phys, 44, 1200 (1973).

[5] Papirno R. P, Mescall J. F, Hansen A. M, Proceedings of the Army Symposium on Solids Mechanics-1980, Technical Rpt AMMRC MS 80-4, Watertown, MA, 1980, p. 367.

[6] Lee E.H., Tupper S.J, J. Appl. MecK Trans. ASME9 21, 63 (1954).

[7] Raftopoulos D, Davids N, AIAA J, 5, 2254 (1967). [Имеется перевод: Рафто-пулос, Дэвиде. Удар упругопластического снаряда о жесткую мишень-Ракетная техника и космонавтика, 1967, № 12, с. 174.].

[8] Recht R.E, Int. J. Eng. Sei, 16, 809 (1978).

[9] Kolsky H., Proc. Phys. Soc, B, 62, 676 (1949).

[10] Lindholm U.S., J. Mech. Phys. Solids9 12, 317 (1964).

[11] DaviesE. D., Phil. Trans. Roy. Soc., London A., 240, 375 (1948).

[12] Davies E.D., Hunter S.C., J. Mech. Phys. Solids9 11, 155 (1963).

[13] ConnAF., J. Mech.9 Phys. Solids9 13, 311 (1965).

[14] Hauser F.E., Simmons J. A., Dorn J. E., in Response of Metals to High Velocity Deformation, P.G. Shewmon V.F. Zackay (Eds.). Interscience, N.Y., 1961, p. 93.

[15] Hauser F. E., Exp. Mech., 6, 395, (1966).

[16] Bell J. F., J. Mech. Phys. Solids, 14, 309 (1966).

[17] Jahsman W.E, J. Appl Mech, rRans. ASME, 38, 75 (1971). [Имеется перевод: Джасмен. Проверка применимости методики Кольского при исследовании динамических характеристик материалов-Труды амер. о-ва инж.-мех, сер. Е: Прикладная механика, 1971, № 1, с. 72.].

[18] Nicholas T, J. Appl. Mech, Trans. ASME, 10, 277 (1973). [Имеется перевод: Николас, Анализ применимости метода разрезного стержня

Гопкинсона при исследовании материалов, характеристики которых зависят от скорости деформации.-Труды амер. о-ва инж.-мех, сер. Е: Прикладная механика, 1973, № 1, с. 288.].

[19] Nelson, Graham, Benedic Journal of Applied Physics. 1961.

[20] HoggatCR., OrrW.R., Recht R. F., 1st Int. Conf. of the Center for High Energy Forming, Estes Park, University of Denver, CO, 1967.

[21] Eleiche A. M, Campbell J. D., Exp. Mech.9 16, 281 (1967).

[22] Lengyel B., Mohitpour M., J. Inst. Meu9 100, 1 (1972).

[23] DanielLM., La Bedz R. H., LiberT., Exp. Mech.9 21, 71 (1980).

[24] Eleiche A. M, Campbell J. D., Exp. Mech.9 16, 281 (1967).

[25] Goldsmith W., Impact, Arnold, London, 1960.

[26] Gorham D. A., in Mechanical Properties at High Rates of Strain, J. Harding (Ed.), Institute of Physics, London, 1980, p. 16.

[27] Harding J., Ed., Mechanical Properties at High Rates of Strain. Institute of Physics, London, No. 47, 1980.

[28] Papirno R. P, Mescall J. F, Hansen A. M, Proceedings of the Army Symposium on Solids Mechanics-1980, Technical Rpt AMMRC MS 80-4, Watertown, MA, 1980, p. 367.

[29] Perzyna P, in Non-Homogeneity in Elasticity and Plasticity, W. Olszak (Ed.), Pergamon, London, 1959, p. 431.

[30] Lee E.H., Tupper S.J, J. Appl. MecK Trans. ASME9 21, 63 (1954).

[31] R.A. Graham, F.W. Nelson Piezoelectric current from shock loaded quartz. Appe. Physics, 1962, v.33 № 11, p 3224-3332.

[32] L.M. Barker. Interferometric technique for measuring the dynamic. Reviw of Scientific Instruments, 1965, v 36 № 11 p.1617-1621.

[33] L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Shock-Wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sappfire // Journal of Applied Physics, Vol. 41, No. 10, September 1970. p.

[34] L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 11, November 1972. p.369-382.

[35] J. R. Asay, L. M. Barker. “Interferometric measurements of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity”// Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 6, June 1974. p. 2540-2550.

[36] W. F. Hemsing, “Push Pull VISAR Modification”// Review of Scientific Instruments, Volume 50, 1979.

[37] Y.I. Meshceryakov, A.K. Divakov, Dynamic structures in shock loded copper. Phys. Dev. 2008 v.78, p 64301-64316.

[38] Л.М. Качанов. О времени разрушения в условиях ползучести. Изв. АН СССР. ОТН. 1958. С. 26-31.

[39] Ю.Н. Работнов. Механизм длительного разрушения. В кн.: Вопросы прочности материалов и конструкций. Изд-во АН СССР, 1959. С. 5-7.

[40] Yu.I. Mescheryakov, A.K. Divakov. Kinetics of microstructure and strain-rate dependence of materials. Dymat Journal. 1994. V. l. No 4. P. 271-287.

[41] Г.И. Каннель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Москва. «Янус-К».1996. 408 с.

[38] Ю.И. Мещеряков. Об эволюционном и катастрофическом режимах динамического деформирования материалов. Доклады РАН. 2004, № 6, С. 177-182.

[39] Ю.И. Мещеряков, С.А. Атрошенко, А.К. Диваков, Ю.Ф. Титовец, Н.С. Наумова. Откольная прочность высокопрочных сталей в ротационном режиме пластичности. Научно-технич. ведомости СПб ГПУ. 2009, С. 95-99.

[40] J.O. Hinze Turbulence. Mc. Graw Hill Inc., New York. 1959, 680 p.

[41] Попов Л.Е. Пудан Л.Я., Колупаева С.Н. и др. Математическое моделирование пластической деформации. - Томск. ТГУ. 1990. - 184 с.

[42] Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. и др. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей. – М. Металлургия. 1989. – 544 с.

[43] Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачев, А.М. Брагов. Лазерный дифференциальный интерферометр. 1973. ЖТФ. Т.49, № 9, с.1961-1965.

[44] L.M. Barker. $\alpha$ -phase Hugniot of iron 1975. *Journ Appl .Phys*. V.**46**, No 8, pp.2544-2547.

[45] Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. СанПиН 2.2.2.548-96.

[46] «Естественное и искусственное освещение». СниП 23-05-95.

[47] Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. СНиП 2.2.4/2.1.8.562-96.

[48] «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». СанПиН 2.2.2.542-96.