

Попова Татьяна Васильевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПОЛИМЕРАХ И МЕТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ
РЕЛАКСАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ**

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Челябинск – 2018

Работа выполнена на кафедре общей и прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

Научный руководитель: **Майер Александр Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

Официальные оппоненты: **Плехов Олег Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заместитель директора по науке «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Хохлов Виктор Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (Москва)

Защита состоится 25 декабря 2018 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.296.03 в Челябинском государственном университете по адресу: 454001, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Е.А. Беленков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время большое внимание уделяется разработке моделей поведения вещества в экстремальных состояниях, возникающих при динамическом ударно-волновом нагружении. При динамическом нагружении материалов имеют место пластическая деформация, фазовые переходы, изменение внутренней структуры, откольное разрушение в результате отражения ударных волн от тыльной поверхности. Большинство исследований посвящено металлам, но также представляют интерес полимерные материалы. Одним из важных процессов для анализа протекающих в материале явлений и оценки свойств материалов является затухание ударного импульса с глубиной, которое часто оценивается по результатам расчетов. Поведение вещества в ударной волне обычно описывается в гидродинамическом приближении, в котором пренебрегают девиаторными компонентами напряжения, ответственными за сопротивление изменению формы тел. Полимеры и металлы обладают вязкоупругими свойствами, т.е. возникающая при деформации девиаторная компонента тензора напряжений (напряжения сдвига) релаксирует со временем. В металлах релаксация сдвиговых напряжений физически связана с движением дислокаций или ростом двойников [1]. В полимерах девиаторная компонента напряжения релаксирует со временем за счет изменения пространственной конфигурации молекул. В металлах девиаторные компоненты напряжения обуславливают формирование упругих предвестников ударной волны [1,2], а также определяют ширину фронта пластической ударной волны и форму волны разгрузки. В случае ультракоротких импульсов сжатия вязкоупругие свойства проявляются даже при давлении за фронтом пластической волны, приводящем к плавлению металла [3]. В работе [4] показано, что учет сдвиговых напряжений влияет на скорость затухания импульсов ударного сжатия в металлах за счет изменения динамики взаимодействия ударной волны и волны разгрузки. Наличие девиаторов напряжений в полимерах также может влиять на структуру ударной волны. Поэтому интересным и актуальным представляется детальное исследование влияния девиаторной части напряжения на распространение импульсов ударного сжатия в металлах и полимерах что позволяет определить границы применимости гидродинамического приближения.

Ударная волна при отражении от свободной поверхности превращается в волну разгрузки, сжимающие напряжения превращаются в растягивающие. Это вызывает рост полостей в веществе, что приводит к отколу. Величина предельного отрицательного давления, достижимого в веществе до начала откола или разрушения, называется откольной прочностью материала. Экспериментальный метод ее определения состоит в возбуждении ударной волны при помощи интенсивного короткоимпульсного лазерного облучения с последующей фиксацией глубины откола на противоположной поверхности материала [5,6]. Откольная прочность может определяться из расчета величины отрицательного давления в экспериментально наблюдаемой плоскости откола. Для оценки надежности получаемых в рамках этой методики значений прочности важным является вопрос, как вязкоупругие свойства материала влияют на изменение амплитуды импульса

ударного сжатия с глубиной. В случае субмикросекундных лазерных импульсов важным фактором является перегрев электронов в металлах на временах меньше характерного времени обмена электронной и ионной компоненты [7,8]. По аналогии актуальным представляется исследовать, как вязкоупругие свойства влияют на импульсы ударного сжатия, длительность которых различным образом соотносится с характерным временем релаксации сдвиговых напряжений.

Структурные модели вязкоупругой деформации полимеров, которые учитывают физические процессы на молекулярном уровне, недостаточно разработаны к настоящему моменту. Это вызвано сложностью детального описания свойств полимерного материала в целом. Существующие сложные комплексные модели описывают квазистатическую деформацию. Хорошо развиты простейшие феноменологические модели вязкоупругости Максвелла, Фойгта и Кельвина, отражающие динамические свойства. Модель Максвелла пригодна для качественного изучения динамической деформации вязкоупругих жидкостей [9]. Эти модели не разделяют напряжение на шаровую и девиаторную часть и требуют определения большого количества констант. В настоящей работе используется подход, разделяющий напряжение на шаровую и девиаторную часть. Для шаровой части применяется хорошо развитый аппарат уравнений состояния, для расчета сдвиговой части напряжения - модели вязкоупругости.

Пластическая деформация металлов, связанная с движением дислокаций, может рассматриваться как релаксационный процесс с переменным временем релаксации, зависящим от плотности дислокации. Обычно используются релаксационные модели с постоянным временем релаксации.

Полимеры и металлы могут в некотором приближении описываться релаксационной моделью Максвелла с различными временами релаксации. Развитие моделей динамической вязкоупругой деформации полимерных материалов и металлов является актуальной задачей теоретической физики. В настоящей диссертации предметом исследования будет влияния вязкоупругих свойств материала (наличия ненулевых сдвиговых напряжений) на изменение амплитуды импульсов ударного сжатия с глубиной. Типичным и практически важным примером полимерного материала является полиметилметакрилат (ПММА), а часто исследуемым металлом с достаточно простой структурой – алюминий.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является теоретическое исследование динамики ударных волн с учетом вязкоупругих свойств в полимерах на примере полиметилметакрилата (ПММА) и металлах на примере алюминия.

Конкретные задачи работы состоят в следующем:

1. Разработка и верификация модели динамической деформации полимеров как вязкоупругой релаксирующей среды Максвелла в одномерном и двумерном приближении.
2. Обобщение модели динамической деформации на случай металлов с учетом переменного времени релаксации, зависящего от состояния дислокационной подсистемы, ее реализация в одномерном приближении.

3. Исследование затухания импульсов ударного сжатия в ПММА и алюминии.
4. Исследование влияния вязкоупругих свойств ПММА на скорость распространения ударных волн и на изменение формы образцов ПММА при динамических воздействиях.

Научная новизна работы

1. Предложен единый подход к описанию вязкоупругих свойств полимеров и металлов на основе модели Максвелла для сдвиговой части напряжений и уравнения состояния для шаровой части напряжений. В случае полимеров новизна состоит в разделении напряжений на сдвиговую и шаровую части. В случае металлов новизна состоит в использовании переменного времени релаксации, зависящего от текущей плотности подвижных дислокаций.
2. Впервые систематически исследован характер влияния вязкоупругих свойств на распределение амплитуды импульса ударного сжатия по глубине от поверхности соударения, в ПММА, в модельных полимерах, а также в алюминии. Показана необходимость учета вязкоупругих свойств полимеров и металлов при обработке результатов динамических экспериментов.
3. Впервые показано, что вязкоупругие свойства, приводящие к ненулевой сдвиговой компоненте напряжений, ответственны за экспериментально наблюдаемое повышение скорости распространения слабых ударных волн в ПММА по сравнению с гидродинамическим приближением.

Научная и практическая значимость работы

Показано, что гидродинамическое моделирование распространения ударных волн в полимерных и металлах лишь приближенно может быть использовано для интерпретации экспериментальных данных, в том числе, для определения откольной прочности, ошибка может достигать десятков процентов. Более точные расчеты необходимо проводить в рамках вязкоупругой модели. Показано, что предложенная модель динамической деформации полимерных материалов, использующая калорическое уравнение состояния для шаровой части напряжений и релаксационное уравнение среды Максвелла, модифицированное с учетом предела текучести, для девиаторной части напряжений, хорошо описывает вязкоупругое поведение ПММА в динамических условиях нагружения умеренной интенсивности. Она может быть использована для расчетов динамической деформации ПММА и позволяет моделировать распространение импульсов ударного сжатия и изменение формы образцов. Показано, что предложенная модель динамической деформации металлов, использующая широкодиапазонное уравнение состояния для шаровой части напряжений и релаксационное уравнение с переменным временем релаксации для девиаторной части напряжений, хорошо описывает вязкоупругое поведение алюминия в динамических условиях нагружения. Она может быть использована для моделирования распространения импульсов ударного сжатия в алюминии.

Методы исследования

Модель сформулирована в приближении механики сплошных сред. Основу модели составляют: уравнение непрерывности, уравнение для внутренней энергии,

уравнение движения и уравнение для девиатора напряжений. Для расчета девиаторных напряжений в ПММА используется модель Максвелла, модифицированная с учетом предела текучести. Для вычисления зависимости давления от внутренней энергии и удельного объема применяется калорическое уравнение состояния. Для расчета девиаторных напряжений в алюминии используется релаксационная модель пластичности Максвелла с переменным временем релаксации. Время релаксации зависит от плотности подвижных дислокаций, которая меняется в ходе деформации в соответствии с уравнениями кинетики дислокационной системы. Для вычисления давления используется широкодиапазонное уравнение состояния. При численном решении применяется метод конечных разностей, интегрирование уравнений в одномерном случае осуществляется по схеме А.П. Яловца, в двумерном случае по схеме с явным введением искусственной вязкости. Верификация результатов происходила путем сравнения с экспериментально определенными другими авторами временными профилями скорости тыльной поверхности нагружаемых образцов в случае алюминия и границы образца и прозрачного окна в случае ПММА, а также по зависимости скорости ударной волны в ПММА от ее интенсивности.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

О достоверности и обоснованности полученных результатов свидетельствуют использование в качестве базиса известных моделей вязкоупругости, апробированных уравнений состояния, апробированных методов численного решения. Проведена верификация разработанной модели путем сравнения с экспериментальными данными для профиля ударной волны и скорости звука.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Модель динамической деформации полимерных материалов и металлов и ее реализация в одномерном случае. В случае полимеров используется калорическое уравнение состояния для шаровой части напряжений и уравнение релаксации среды Максвелла с учетом предела текучести для девиаторной части напряжений. В случае металлов используется широкодиапазонное уравнение состояния для шаровой части напряжений и уравнение релаксации с переменным временем релаксации для девиаторной части напряжений; время релаксации рассчитывается по текущей плотности подвижных дислокаций.
2. Наличие дополнительной жесткости, связанной со сдвиговыми напряжениями, увеличивает скорость распространения ударных волн в полимерных материалах, в результате скорость слабых ударных волн в ПММА на 300 м/с больше объемной скорости звука. При этом характерный для металлов упругий предвестник в случае ПММА не наблюдается.
3. На малых расстояниях от поверхности соударения импульс ударного сжатия имеет бóльшую амплитуду в вязкоупругом приближении за счет дополнительной жесткости по сравнению с гидродинамическим приближением.
4. На больших расстояниях от поверхности соударения амплитуда импульса ударного сжатия в вязкоупругом приближении становится меньше, чем в

гидродинамическом, за счет большей скорости распространения волны разгрузки, раньше догоняющей фронт ударной волны.

5. Обобщение модели динамической деформации полимерных материалов на двумерный случай.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах кафедры теоретической физики ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» и представлялись на конференциях: «XIX Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, февраль 2015), Международная конференции «Забабахинские научные чтения - 2014» (Снежинск, июнь 2014), XXVI Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» (Санкт-Петербург, сентябрь 2015), Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков, посвященная 100-летию со дня рождения первого ректора БашГУ Ш.Х. Чанбарисова (Уфа, апрель 2016), XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Эльбрус, март 2016), Международная конференции «Забабахинские научные чтения - 2017» (Снежинск, март 2017), XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, март 2017).

Публикации и личный вклад

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 статей в рецензируемых изданиях, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и приравненных к ним, и 8 тезисов докладов научных конференций. Автор участвовал в постановке задачи, выборе модели, определении параметров. Автором написаны программы на языке FORTRAN для одномерного и двумерного варианта модели, выполнены все численные расчеты, представленные в диссертации, проведен их анализ и сравнение с экспериментом. Вклад автора в публикации по теме диссертации являлся определяющим.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 153 страницы, содержит 66 рисунков и 2 таблицы. Список цитированной литературы составляет 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и указана их научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, их достоверность, описана структура диссертации.

Глава 1 носит обзорный характер и состоит из восьми разделов, посвященных описанию основных свойств полимерных материалов и металлов и существующих моделей их деформации.

В разделе 1.1 рассмотрены актуальные вопросы, связанные с динамикой ударных волн в металлах и полимерах.

В разделе 1.2 рассмотрены физические состояния, структура и механические свойства полимеров.

В разделе 1.3 рассмотрены структура и свойства металлов, а также дефекты кристаллической решетки.

В разделе 1.4 рассмотрены особенности деформация материалов и методы ее описания.

В разделе 1.5 описана стандартная схема испытаний по высокоскоростному соударению пластин и интенсивному лазерному облучению.

В разделе 1.6 рассмотрены модели деформирования полимеров и металлов. Модели, которые учитывают физические процессы на молекулярном уровне, не достаточно разработаны к настоящему моменту. Это вызвано сложностью детального описания свойств полимерного тела в целом. Хорошо развиты простейшие модели. Для металлов существуют модели, которые опираются на описание физических процессов пластической деформации, в частности движений дислокаций. Такие модели требуют дополнительного расчета плотности и скорости дислокаций во всех системах скольжения, что позволяет вычислить тензор пластической деформации.

В разделе 1.7 рассмотрено калорическое уравнение состояния полимерных материалов [10], которое в простом аналитическом виде выражает связь внутренней энергии, давления и объема.

В разделе 1.8 приведены выводы по первой главе.

Глава 2 состоит из пяти разделов и посвящена модели для описания вязкоупругих свойств материалов в одномерном случае. Предложен подход к описанию вязкоупругих свойств полимеров на основе модели Максвелла для сдвиговой части напряжений и калорического уравнения состояния для шаровой части напряжений. Предложен подход к описанию вязкоупругих свойств металлов на основе модели Максвелла с переменным временем релаксации. Целью главы является исследование влияния динамики ударной волны с учетом вязкоупругих свойств полимерных материалов и металлов (наличия ненулевых девиаторов) в сравнении с гидродинамическими расчетами в одномерном плоском случае.

В разделе 2.1 приведена основная система уравнений механики сплошных сред [11] в одномерном виде:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \rho^{-1} \frac{\partial \sigma}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \sigma \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (3)$$

где v - скорость; ρ - плотность; $\sigma = -P + S_{zz}$ - полное напряжение; P - давление; S_{zz} - девиатор напряжения; E - удельная внутренняя энергия. Система состоит из уравнения непрерывности (1), уравнения движения (2) и уравнения для внутренней

энергии (3). Систему следует дополнить уравнением для девиатора напряжений (закон Гука):

$$S_{zz} = 2G \left[\frac{2}{3} u_{zz} - w_{zz} \right], \quad (4)$$

где G — модуль сдвига; w_{zz} — компонента тензора пластической деформации; u_{zz} — компонента тензора деформации, определяемая макроскопическим движением вещества:

$$\frac{du_{zz}}{dt} = \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (5)$$

Для описания девиаторной части напряжений используется модель Максвелла, также проводится сравнение с моделью Фойгта. Для тензора пластической деформации согласно модели Максвелла записываем:

$$\frac{dw_{zz}}{dt} = \left(\frac{2}{3} u_{zz} - w_{zz} - \frac{y_b}{2G} \right) \tau^{-1} \times \theta(|S_{zz}| - y_b), \quad (6)$$

где θ — функция Хевисайда, τ — характерное время релаксации сдвиговых напряжений. Пластическое течение начинается при значении девиатора S_{zz} больше пороговой величины y_b , характеризующей статический предел текучести. Уравнение (6) представляет собой обобщение модели Максвелла на случай учета пороговых напряжений. Как показывают результаты расчетов, модель Максвелла (6) может быть использована непосредственно для ПММА с постоянными значениями времени релаксации и предела текучести. В случае металлов время релаксации обратно пропорционально плотности дислокаций [12]

$$\tau = \frac{8B}{3\rho_D G b^2} \quad (7)$$

где ρ_D скалярная плотность подвижных дислокаций, b — модуль вектора Бюргера, B — коэффициент трения дислокаций. Время релаксации в металлах существенно зависит от плотности подвижных дислокаций, которая изменяется под действием ударной волны. Поэтому мы учитываем соответствующее изменение времени релаксации, используя уравнение (7) и кинетическое уравнение для плотности подвижных и неподвижных дислокаций (8):

$$\frac{d\rho_D}{dt} = K_1 \left(\frac{3}{2} S_{zz} \frac{dw_{zz}}{dt} \right) - V_I (\rho_D - \rho_O) \sqrt{\rho_I} - K_a \frac{dw_{zz}}{dt} (2\rho_I + 2\rho_D), \quad (8a)$$

$$\frac{d\rho_I}{dt} = V_I (\rho_D - \rho_O) \sqrt{\rho_I} - K_a \frac{dw_{zz}}{dt} \rho_I, \quad (8b)$$

где ρ_I — плотность неподвижных дислокаций, ρ_O — пороговая плотность дислокаций, выше которой начинается иммобилизация, K_1 , K_a , и V_I — параметры кинетических уравнений. Мы используем температурную зависимость коэффициента трения дислокации, определенную в [13] по результатам молекулярно-динамического моделирования

$$B = B_0 + B_1 T \quad (9)$$

где $B_0 = 0.67 \times 10^{-5}$ Па×с, $B_1 = 2.55 \times 10^{-8}$ Па×с /К.

Предел текучести зависит от плотности неподвижных дислокаций; зависимость описывается законом Тейлора [4]

$$y_b = y_0 + AGb\sqrt{\rho_l} \quad (10)$$

где y_0 является пределом текучести в кристалле без дефектов, A – параметр упрочнения.

Решение системы уравнений проводилось при помощи численного метода, предложенного Яловцом А.П. [14]. Для тестирования программы была проведена серия расчетов модельной задачи о поршне в сравнении с аналитическим решением. При проведении расчетов задачи о соударении (раздел 2.3) контролировалось выполнение законов сохранения энергии и импульса: изменение этих величин составило менее 1%.

В разделе 2.2 кратко описана программная реализация численного решения предложенной системы уравнений.

В разделе 2.3 проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Характерные профили ударной волны в последовательные моменты времени для задачи о соударении пластин приведены на рис. 1. В задаче ударная волна распространяется по образцу толщиной 2,2 мм.

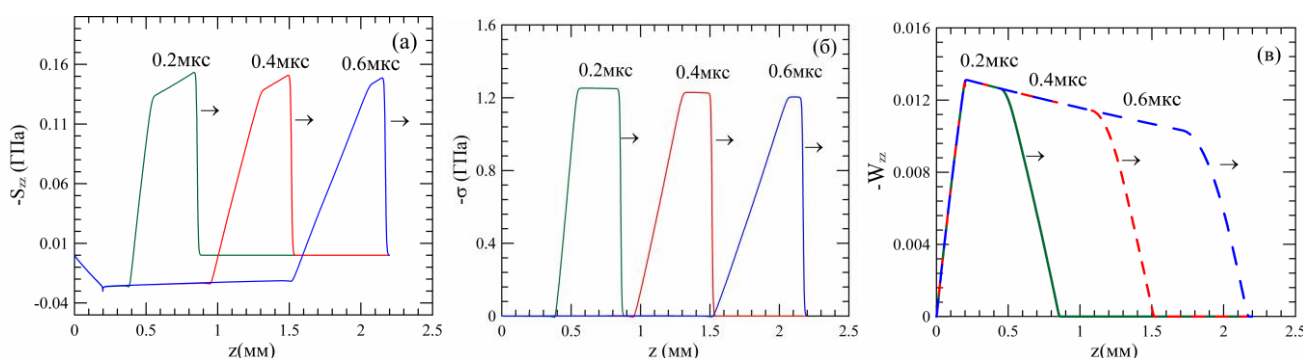


Рис. 1. Соударение пластин ПММА. Пространственные распределения а) девиатора напряжений, б) полных напряжений и в) компоненты тензора пластической деформации в последовательные моменты времени.

Толщина ударника составляет 0,2 мм. Материалом ударника и мишени является ПММА. Ударник налетает на мишень со скоростью 645 м/с. Согласно рис. 1.б, для полного напряжения видим (справа налево): фронт ударной волны, область постоянного напряжения за фронтом, волну разгрузки, которая следует за ударной волной. Постепенно волна разгрузки догоняет фронт ударной волны, при этом форма импульса сжатия меняется от прямоугольной до треугольной. Для сдвиговых напряжений, характеризуемых девиатором S_{zz} , также видим (рис. 1.а) резкий рост на фронте ударной волны. Поскольку модуль сдвига ПММА мал по сравнению с объемным модулем упругости, амплитуда сдвиговых напряжений (рис. 1.а) на фронте на порядок меньше полных напряжений (рис. 1.б). За фронтом ударной волны сдвиговое напряжение S_{zz} релаксирует на характерных временах порядка τ , что приводит к постепенному спаду S_{zz} при сохранении полных напряжений на постоянном уровне. Одновременно с релаксацией S_{zz} растет величина пластической деформации w_{zz} (рис. 1.в) В волне разгрузки сдвиговые и

полные напряжения резко уменьшаются и дальнейший рост w_{zz} прекращается. Изменение знака сдвиговых напряжений S_{zz} связано с остаточной пластической деформацией. Части кривых для сдвиговых напряжений за импульсом ударного сжатия повторяют форму кривых для w_{zz} . Амплитуда пластической деформации с глубиной уменьшается, это связано с тем, что импульсы сжатия становятся треугольными и меньше времени отводится пластической деформации. Пластическая деформация накапливается и остается ненулевой при уходе импульса сжатия из данной части мишени.

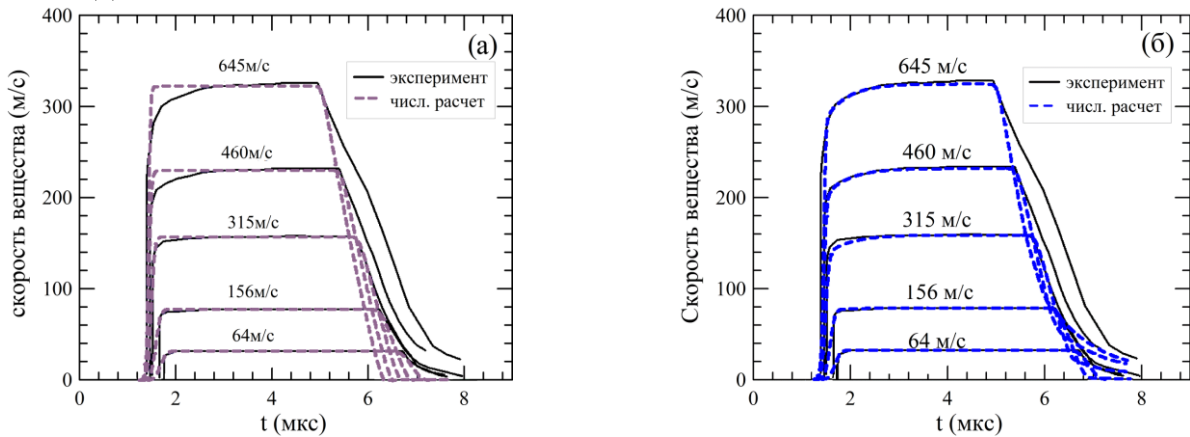


Рис. 2. Импульс ударного сжатия: зависимость скорости вещества от времени в сравнении с экспериментальными данными [15]. а) Расчеты по модели Фойгта; б) расчеты по модели Максвелла.

На рис. 2.а. и 2.б. представлены результаты сравнения численных расчетов с использованием модели Фойгта и Максвелла с экспериментальными данными [15]. Для модели Максвелла с постоянным временем релаксации наблюдается хорошее совпадение расчетных [16,17] и экспериментальных данных [15] для фронта ударной волны, в области волны разрежения имеет место заметное расхождение. Результаты были рассчитаны со следующими параметрами для модели Максвелла: $G = 1.5$ ГПа [18], $\tau = 0.4$ мкс, $y_b = 38$ МПа. Эти параметры соответствуют наилучшему совпадению с экспериментальными данными. Результаты наших расчетов качественно соответствуют результатам моделирования из работ [16,17], также полученным с использованием модели Максвелла. Модель Фойгта не описывает ни фронт ударной волны, ни структуру волны разрежения. Подбор параметров модели не позволил получить совпадение с экспериментом. Результаты расчетов с использованием модели идеально пластичного тела (сдвиговые напряжения не превышают предела текучести) и в гидродинамическом приближении (сдвиговые напряжения отсутствуют) соответствуют расчетам с использованием модели Фойгта.

На рис.3. представлено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [15,19-22] для зависимости скорости ударной волны от скачка скорости вещества на ней. Для слабых ударных волн учет вязкоупругих свойств позволяет добиться лучшего совпадения с экспериментальными данными. При стремлении интенсивности ударной волны к нулю, ее скорость стремится к величине, большей объемной скорости звука. Разница составляет 300 м/с. Это

происходит из-за наличия девиаторной части напряжений в вязкоупругой модели, которая обеспечивает большую жесткость материала.

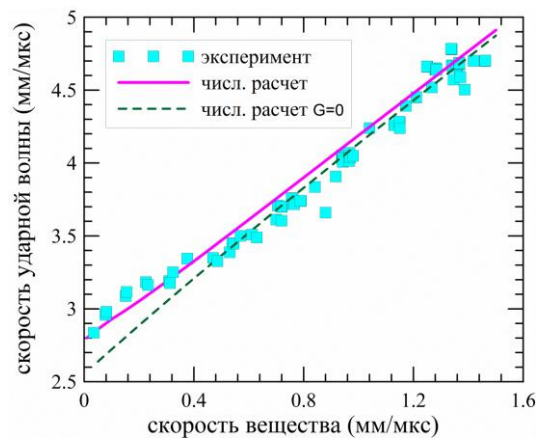


Рис. 3. Зависимость скорости ударной волны от скачка скорости в ударной волне.

Эволюция импульса ударного сжатия в алюминии показана на рис. 4. при ударе с теми же параметрами, что и для ПММА на рис.1. На рис. 4.б, для полного напряжения мы видим (справа налево): упругий предшественник, фронт пластической ударной волны, область постоянного напряжения за фронтом, упругие и пластические волны разрежения, которые следуют за ударной волной.

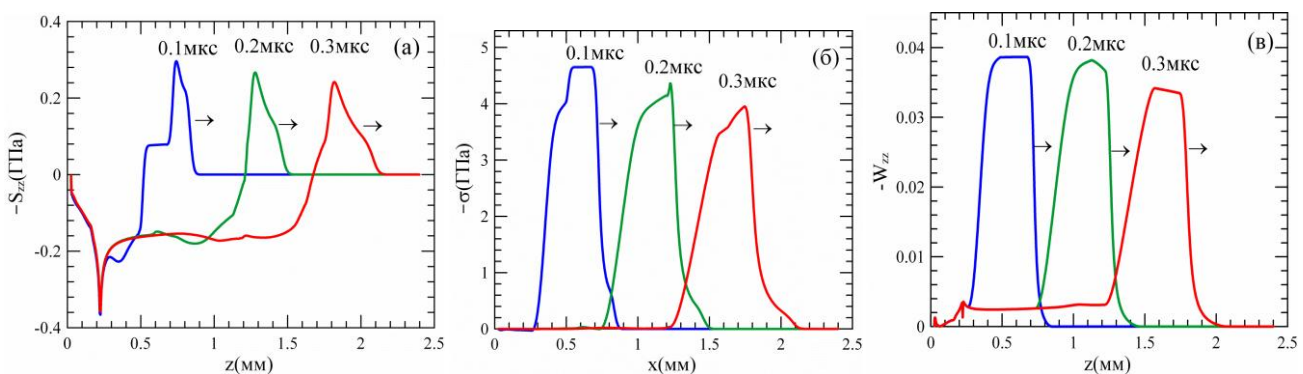


Рис. 4. Распространение импульса ударного сжатия в алюминии. Пространственные распределения а) девиатора напряжений; б) полных напряжений, в) компоненты тензора пластической деформации в последовательные моменты времени.

Постепенно упругая волна разгрузки догоняет фронт ударной волны, что приводит к резкому уменьшению амплитуды импульса сжатия. Профиль импульса сжатия постоянно меняется. Девиаторы напряжений (рис. 4.а) и величина пластической деформации (рис. 4в) растут на фронте упругого предшественника и основной пластической ударной волны. За фронтом ударной волны сдвиговые напряжения релаксируют до предела текучести и остаются постоянными в течение некоторого времени, что хорошо видно на рис. 4.а для 0,1 мкс. Приход упругой и пластической волны разгрузки приводит к падению пластической деформации и девиаторов напряжения. Знак девиаторов меняется на противоположный, и после прохождения импульса сжатия они также возвращаются на уровень предела текучести. Предел текучести неоднороден, так как зависит от локальной плотности неподвижных дислокаций. В плоскости соударения деформация происходит с большей скоростью, действующее сдвиговое напряжение выше, в результате пластической

деформации достигается более высокая температура, чем в окружающих слоях. Пики в области границы ударника и образца видны на распределениях девиаторов и пластической деформации.

Сравнение расчетов с экспериментальными профилями скорости тыльной поверхности для алюминия приведено на рис. 5. Характерными особенностями является отсутствие пика на упругом предвестнике при комнатной температуре и меньшая амплитуда предвестника. Это связано с двумя причинами. Коэффициент трения дислокаций при низкой температуре ниже, чем при высокой температуре; время релаксации меньше, значит скорость пластической релаксации больше. Подобранный начальная плотность дислокаций подвижных дислокаций при нормальной температуре на порядок больше, чем при повышенных температурах, что может быть связано с отжигом дислокации в образце при повышенных температурах.

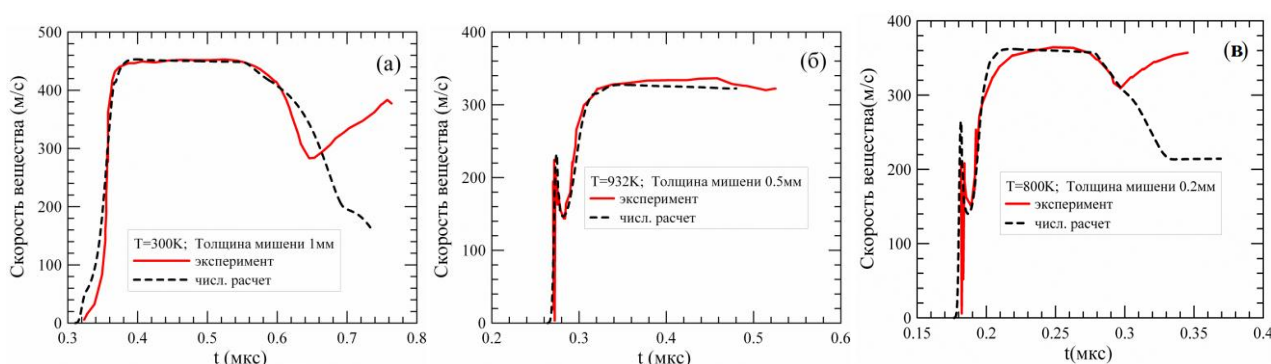


Рис. 5. Профили скорости тыльной поверхности образцов Al при различной температуре и разной толщине образцов. Сравнение с экспериментальными данными [23].

В разделе 2.4 исследуется затухание импульса сжатия в полиметилметакрилате и алюминии. На рис.6 представлены результаты расчетов динамики УВ, сгенерированной высокоскоростным ударом в ПММА. В начальные моменты времени амплитуда в вязкоупругом приближении больше амплитуды в гидродинамическом приближении. Для объяснения этого был проведен расчет соударения одинаковых по толщине ударников таким образом, чтобы волна разгрузки не влияла на распределения величин.

Результаты показывают наличие области повышенных напряжений на малых глубинах (порядка миллиметра) от плоскости соударения в случае вязкоупругого приближения (рис.7.). В этой области напряжение сначала превышает тот уровень, который устанавливается за стационарной ударной волной (см. кривую для максимального напряжения). С течением времени напряжение понижается и достигает уровня стационарной ударной волны (см. кривую для текущего напряжения).

На рис.6 амплитуда УВ в гидродинамическом приближении сначала остается постоянной, в то время как в вязкоупругом медленно уменьшается. В гидродинамическом и вязкоупругом приближении материал обладает разной жесткостью за счет наличия ненулевых девиаторов напряжений. Поэтому при соударении начальная амплитуда в вязкоупругом случае больше, чем в

гидродинамическом. По мере движения скорость деформации падает, и роль вязких девиаторов напряжения уменьшается. При распространении УВ ее амплитуда сначала уменьшается до значения соответствующего гидродинамическому случаю, а затем становится меньше за счет более раннего взаимодействия УВ и волны разгрузки.

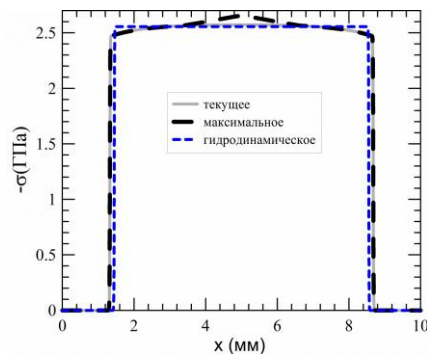
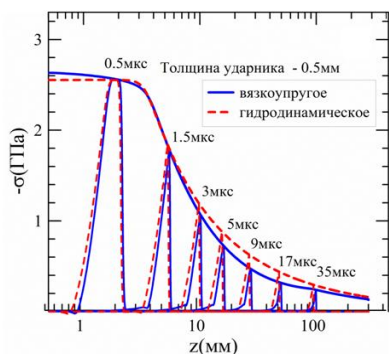


Рис.6. Эволюция профилей ударной волны и зависимости полного напряжения от координаты при соударении пластин ПММА со скоростью 1200 м/с. Толщина образца 300 мм, толщина ударника 0,5 мм;

Рис.7. Зависимость полного напряжения от координаты при соударении пластин ПММА со скоростью 1200м/с. Толщина образца 5 мм, толщина ударника 5 мм.

Аналогичные рис. 6. зависимости для алюминия показаны на рис. 8. Для алюминия, как и для ПММА, можно выделить две ситуации. Вначале амплитуда ударной волны в вязкоупругом приближении больше, чем в гидродинамическом, из-за более высокой жесткости. Амплитуда вязкоупругой волны остается выше гидродинамической до расстояний примерно в 4 раза превышающих толщину ударника. При больших глубинах упругая волна разгрузки догоняет ударную волну, и ситуация меняется на противоположную. Различие между амплитудами ударной волны в алюминии в вязкоупругом и гидродинамическом приближении может достигать десяти раз. Максимальное различие в значениях амплитуды ударного сжатия составляет около 35% для ПММА и около 90% для алюминия, поэтому гидродинамические расчеты могут быть слишком грубыми.

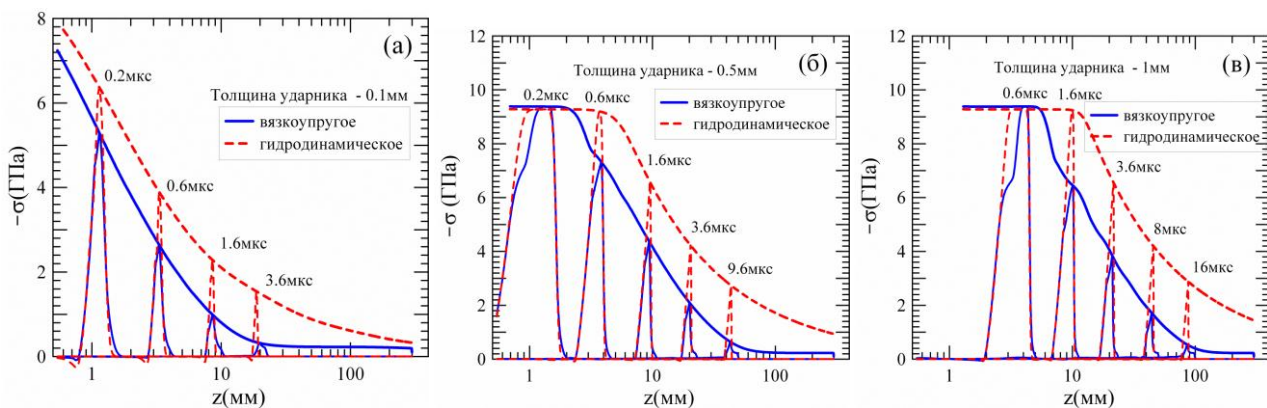


Рис. 8. Эволюция профилей ударной волны и зависимости полного напряжения от координаты при соударении пластин алюминия со скоростью 1200 м/с. Толщина образца 300 мм, толщина ударника: а) 0,1 мм; б) 0,5 мм; в) 1 мм.

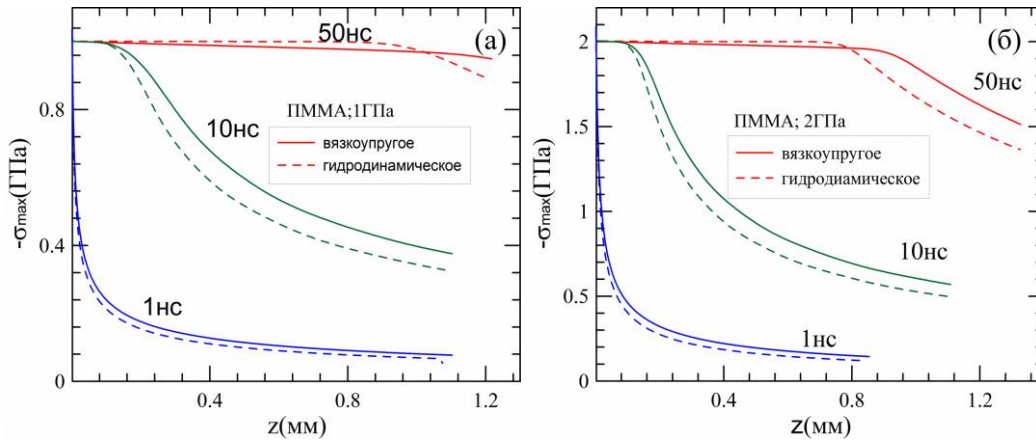


Рис. 9. Пространственное распределение максимальных значений полного напряжения в ПММА для плоских ударных волн. Импульс давления амплитуды 1 ГПа (а) и 2 ГПа (б); длительность импульса 50, 10 и 1нс. Расчеты в гидродинамическом (пунктирная линия) и вязкоупругом (сплошные линии) приближении.

Была исследована динамика импульсов ударного сжатия, возникающих при воздействии на поверхность ПММА импульсов давления микро-, нано- и пикосекундного диапазонов длительности (рис.9). Такие импульсы моделируют воздействие интенсивного лазерного облучения различных временных диапазонов. Если импульс давления лежит в диапазоне нано- и пикосекундной длительности, то реализуется режим, когда амплитуда вязкоупругой волны больше гидродинамической. То же наблюдается и на малых толщинах при соударении пластин, что соответствует пику на рис 7. Для данной длительности импульса эволюция происходит на временах, существенно меньше характерного времени релаксации, которое составляет для ПММА 0.4 мкс. Поэтому релаксация сдвиговых напряжений в данных режимах несущественна и распространение волны происходит в упругом режиме. При микросекундном импульсе растяжения наблюдается обратная картина, волна разгрузки успевает догнать ударную волну и за счет этого уменьшается амплитуда импульса сжатия.

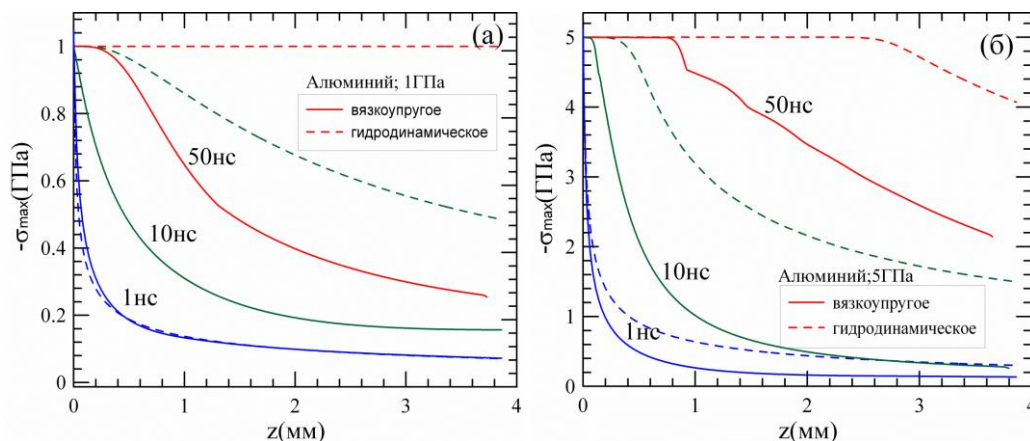


Рис. 10. Пространственное распределение максимальных значений полного напряжения в алюминии для плоских ударных волн. Импульс давления амплитуды 1 ГПа (а) и 5 ГПа (б).

Аналогичные зависимости для алюминия показаны на рис. 10. Различие по амплитуде между расчетами в гидродинамическом и вязкоупругом приближении достигает порядка 90%.

Было исследовано влияние вариации параметров модели Максвелла: предела текучести (y_b), времени релаксации (τ), модуля сдвига (G) на затухание импульса ударного сжатия (модельные полимеры). Результаты приведены на рис. 11, который показывает кривые затухания импульсов ударного сжатия. Параметры модели для ПММА: $G = 1.5$ ГПа, $\tau = 0.4$ мкс, $y_b = 38$ МПа. На рис. 11.а приведены данные для дополнительных значений предела текучести: 400МПа, 160МПа, 1МПа, при этом время релаксации и модуль сдвига оставались соответствующими ПММА. При уменьшении предела текучести отклонение от кривой для ПММА наблюдается только для больших глубин, где амплитуда определяется взаимодействием с волной разгрузки. При увеличении предела текучести в большей степени сохраняются избыточные сдвиговые напряжения, влияние релаксации уменьшается, и поведение стремится к чисто упругому случаю. При этом большая жесткость материала приводит к тому, что кривая затухания при больших значениях предела текучести лежит выше кривой для гидродинамического приближения во всем рассмотренном диапазоне глубин.

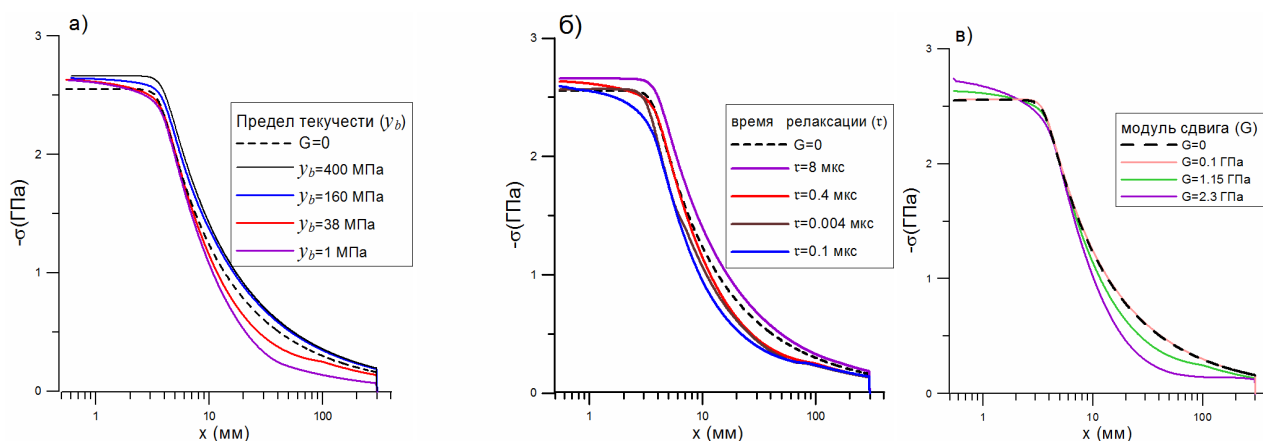


Рис. 11. Влияние параметров модели: а) предела текучести (y_b); б) времени релаксации (τ); в) модуля сдвига (G) на затухание импульса ударного сжатия для ПММА в сравнении с гидродинамическим приближением ($G=0$). Соударение пластин со скоростью 1200 м/с. Толщина образца 300 мм, толщина ударника 0,5 мм.

На рис. 11.б приведены данные для дополнительных значений времени релаксации: 8мкс, 0.004мкс и 0.1мкс, при этом предел текучести и модуль сдвига оставались соответствующими ПММА. При увеличении времени релаксации до величины 8 мкс, много большей времени действия импульса сжатия, релаксация сдвиговых напряжений на участке от фронта ударной волны до волны разгрузки не успевает произойти, что соответствует упругому пределу. При времени релаксации 0.004 мкс, много меньшем времени действия импульса сжатия, релаксация оказывается настолько эффективной, что соответствующая кривая практически совпадает с гидродинамическим приближением на начальном участке. На последующем участке, где уменьшение амплитуды определяется взаимодействием

с волной разгрузки, наблюдается характерное для всех вязкоупругих кривых более быстрое затухание по сравнению с гидродинамическим приближением. Даже при столь малом времени релаксации скорость волны разгрузки оказывается больше, чем в гидродинамическом приближении. Более сложное поведение наблюдается для времени релаксации 0.1 мкс; в этом случае время разгрузки совпадает с длительностью импульса сжатия и наблюдается сложное воздействие релаксации на форму кривой затухания.

На рис. 11.в приведены данные для дополнительных значений модуля сдвига: 0.1 ГПа и 2.3 ГПа, при этом предел текучести и время релаксации оставались соответствующими ПММА. При низком значении модуля сдвига (0.1 ГПа) форма кривой неотличима от гидродинамического приближения. С увеличением модуля сдвига более ярко проявляется отклонение от гидродинамического поведения, как в области малых толщин, так и в области больших толщин.

В разделе 2.5 приведены выводы по второй главе.

Глава 3 состоит из пяти разделов и посвящена обобщению модели вязкоупругой среды Максвелла на двумерное напряженное состояние. Уравнение релаксации записывается для касательных напряжений в той плоскости, в которой действуют максимальные касательные напряжения.

В разделе 3.1 приведена математическая модель двумерной деформации. Приводится основная система уравнений механики сплошных сред [11]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial v_k}{\partial x_k}, \quad (11)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + \eta_1 \Delta v_i, \quad (12)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ik} v_{ik}, \quad (13)$$

где v_i - скорость; ρ - плотность; $\sigma_{ik} = -P\delta_{ik} + S_{ik}$ - полное напряжение; P - давление; S_{ik} - девиатор напряжения; η_1 - коэффициент вязкости, E - удельная внутренняя энергия. Система состоит из уравнения непрерывности (11), уравнения движения (12) и уравнения для внутренней энергии (13). Систему следует дополнить уравнением для девиатора напряжений (закон Гука):

$$S_{ik} = 2G \left[u_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} u_{ll} - w_{ik} \right], \quad \text{где } u_{ll} = u_{xx} + u_{yy}, \quad (14)$$

где w_{ik} - тензор пластической деформации, G - модуль сдвига; u_{ik} - компонента тензора деформации, определяемая макроскопическим движением вещества:

$$\frac{du_{ik}}{dt} = \frac{1}{2} (v_{ik} + v_{ki}) + o_{ik}, \quad (15)$$

$$v_{ik} = \frac{\partial v_i}{\partial x_k}.$$

где o_{ik} - добавочная компонента, которая учитывает вращение элемента объема по отношению к системе координат. Релаксационное уравнение среды Максвелла применимо для касательных напряжений в плоскости, где действует максимальное

касательное напряжение. Поворот необходим для перехода к главным осям и учета пороговых напряжений. Рассмотрим вспомогательную систему координат, которая повернута относительно лабораторной системы координат на угол φ . Следующее значение угла необходимо для перехода к главным осям

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2S_{xy}}{S_{yy} - S_{xx}} \right), \quad (16)$$

Максимальное касательное напряжение в главных осях равно полуразности главных напряжений

$$\sigma_{\tau} = \frac{S_{x'x'} - S_{y'y'}}{2}, \quad (17)$$

где

$$S_{x'x'} = \frac{1}{2}(S_{yy} + S_{xx}) + \frac{1}{2}\sqrt{(S_{yy} - S_{xx})^2 + 4S_{xy}^2}, \quad (18)$$

$$S_{y'y'} = \frac{1}{2}(S_{yy} + S_{xx}) - \frac{1}{2}\sqrt{(S_{yy} - S_{xx})^2 + 4S_{xy}^2}. \quad (19)$$

Для тензора пластической деформации согласно модели Максвелла записываем

$$\frac{dw_{x'x'}}{dt} = \frac{1}{2G\tau} \left(\frac{4}{3}\sigma_{\tau} - y_b \right) \times \theta \left(\left| \frac{4}{3}\sigma_{\tau} \right| - y_b \right). \quad (20)$$

Пластическая деформация сохраняет объем, предполагаем $w_{z'z'} = 0$ тогда имеем

$$\frac{dw_{x'x'}}{dt} = -\frac{dw_{y'y'}}{dt}. \quad (21)$$

Уравнения для пластической деформации в лабораторной системе координат

$$\begin{aligned} \frac{dw_{xx}}{dt} &= \frac{dw_{x'x'}}{dt} \cos(2\varphi) + O_{xx}, \\ \frac{dw_{xy}}{dt} &= \frac{dw_{x'x'}}{dt} \sin(2\varphi) + O_{xy}, \\ \frac{dw_{yy}}{dt} &= -\frac{dw_{x'x'}}{dt} \cos(2\varphi) + O_{yy}, \end{aligned} \quad (22)$$

где O_{ik} добавочная компонента, которая учитывает вращение элемента объема по отношению к системе координат. Полученные уравнения представляют собой модель пластичности полимера, описанного для 2D случая.

Уравнения модели решались численно при помощи метода конечных разностей. Используются интегральные определения частных производных для записи всех производных по пространству.

Из (11) для внутренней энергии можно записать разностное уравнение

$$E^{[n+1]} = E^{[n]} + \left(-P^{[n]}(V - V^{[n]}) + \Delta Q \right) / m, \quad (23)$$

где Q - работа касательных напряжений за шаг интегрирования Δt

$$\Delta Q = \left(S_{xx}v_{xx} + S_{yy}v_{yy} + \frac{1}{2}S_{xy}(v_{xy} + v_{yx}) \right) \Delta t V. \quad (24)$$

Тензор деформации:

$$u_{ik}^{[n+1]}(t) = u_{ik}^{[n]} + \Delta t \frac{1}{2} (v_{ik} + v_{ki}). \quad (25)$$

Временной шаг выбирается исходя из условия Куранта:

$$\Delta t = K d_{\min},$$

где константа $K \approx 0.01$, d_{\min} - минимальная диагональ по всем ячейкам.

В разделе 3.2 при проведении расчетов задачи о соударении (раздел 3.2) контролировалось выполнение законов сохранения энергии и импульса: изменение этих величин составило менее 1%.

В разделе 3.3 приводится моделирование высокоскоростного соударения пластин полиметилметакрилата.

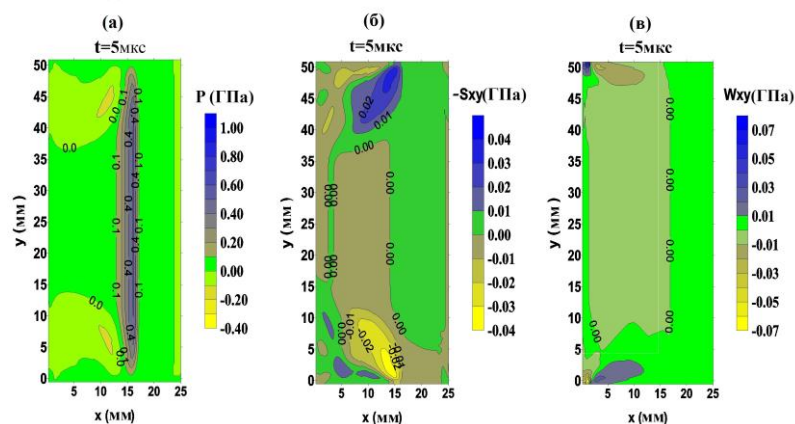


Рис. 12. Пространственное распределение: а) давления; б) компоненты девиатора напряжения; в) компоненты тензора пластической деформации.

На рис.12 изображены пространственные распределения величин. Задача состоит в плоском соударении пластины ударника и пластины мишени, рассчитанные в двумерной постановке. Ударник из ПММА налетает на образец из ПММА со скоростью 645 м/с; толщина ударника составляет 6.35 мм; толщина мишени составляет 18.65 мм, высота образца 50 мм.

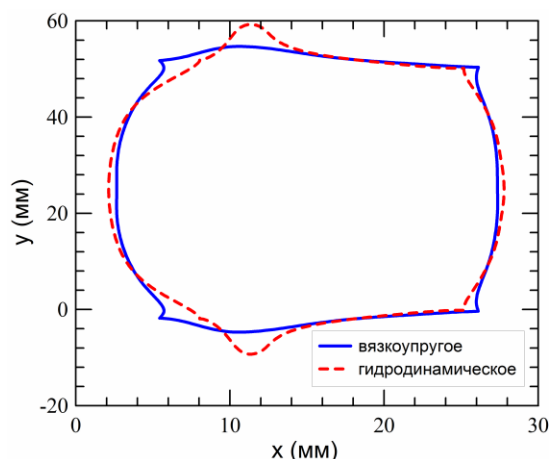


Рис. 13. Профиль образца и ударника после столкновения на момент времени 16 мкс: сравнение вязкоупругого и гидродинамического приближения.

Рис. 12.б показывает, что боковая разгрузка изменяет диагональные компоненты и приводит к возникновению недиагональных. На рис. 12.в показано

пространственное распределение компоненты тензора пластической деформации, которая максимальна вблизи боковой поверхности. На рис. 13. показаны профили внешних границ расчетной области, полученные в гидродинамическом и вязкоупругом приближении. Начальная форма области до столкновения была прямоугольная; деформация вещества изменила эту форму. В случае гидродинамического приближения полученный профиль имеет типичную форму: есть выступ вблизи ударной плоскости, вызванного градиентом давления. В случае вязкоупругого приближения, профиль сохраняет свою форму в большей степени. Также есть пластическое течение, но оно ограничено упругостью и имеет тенденцию поддерживать форму.

В разделе 3.4 рассматривается воздействие локализованного импульса давления. На рис.14. показаны зависимости амплитуды ударной волны от глубины для цилиндрически расходящейся УВ в гидродинамическом и вязкоупругом приближении. Максимальное продольное напряжение $-\sigma_{\max} = P - S_{xx}$ проявляется в случае вязкоупругих расчетов. Основной вклад в уменьшении амплитуды волны дает то, что сама УВ является цилиндрическая, значит, она расходится и при удалении от центра со временем ее радиус падает. Следовательно, эффект расходящихся ударных волн преобладает над влиянием вязкоупругих свойств.

На рис. 15. приведены результаты расчетов для импульса давления амплитудой 45 ГПа и длительностью импульса 0,5 нс. Показано пространственное распределение давления и интенсивности сдвиговых напряжений $S_{inv} = \sqrt{3(S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{xx} \cdot S_{yy} + S_{xy}^2)}$. Плоская ударная волна становится цилиндрически расходящейся с течением времени; ее амплитуда быстро убывает. Сдвиговые напряжения пренебрежимо малы на начальном этапе, но постепенно они становятся сравнимыми с давлением. Воздействие на поверхность образца создает импульс сжатия, состоящий из слабой ударной волны и следующей за ней волны разрежения. Поскольку предел текучести ПММА мал, даже такая слабая волна вызывает пластическую деформацию в объеме образца (см. рис. 15).

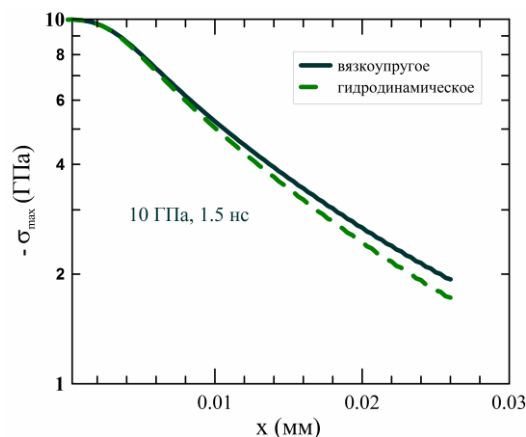


Рис. 14. Глубина распределения максимального значения напряжения в ПММА для цилиндрически расходящейся ударной волны. Рассмотрен импульс давления амплитудой 10 ГПа и длительностью 1,5 нс. Расчеты в гидродинамическом (пунктирная линия) и вязкоупругом (сплошная линия) приближении.

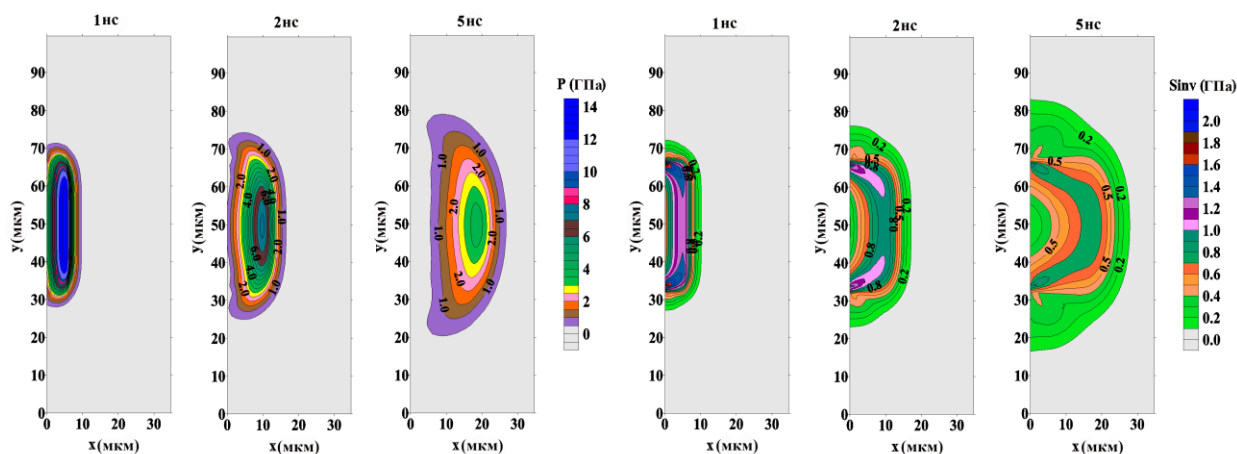


Рис. 15. Пространственное распределение давления P и интенсивности сдвиговых напряжений S_{inv} . Действие импульса давления с амплитудой 45 ГПа и длительностью 0,5 нс на площадке линейным размером 33 мкм на передней поверхности образца ПММА.

В разделе 3.5 приводятся выводы по третьей главе.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана и протестирована модель динамической деформации полимеров на основе релаксационного уравнения среды Максвелла для сдвиговой части напряжений и калорического уравнения состояния для шаровой части напряжений.
2. Разработана и протестирована модификация модели для случая металлов, учитывающая переменное время релаксации сдвиговой части напряжений и широкодиапазонное уравнение состояния для шаровой части напряжений.
3. Впервые показано, что вязкоупругие свойства влияют на распределение амплитуды импульса ударного сжатия по глубине от поверхности соударения, в ПММА, в модельных полимерах, а также в алюминии. Максимальное различие между двумя приближениями по амплитуде ударного импульса достигает десятков процентов. Амплитуда импульса ударного сжатия в вязкоупругом приближении в сравнении с гидродинамическим больше для малых глубин за счет дополнительной жесткости и меньше для больших глубин за счет большей скорости распространения волны разгрузки, догоняющей фронт ударной волны.
4. Впервые показано, что вязкоупругие свойства полимеров влияют на скорость распространения ударных волн. За счет вязкоупругих свойств скорость слабых ударных волн в ПММА на 300 м/с (10%) больше объемной скорости звука.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в изданиях из списка ВАК и приравненных к ним

1. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. Evolution of shock compression pulses in polymethylmethacrylate and aluminum // Journal of Applied Physics.-2018. – V. 123. – P. 235902.
2. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. Numerical investigations of shock wave propagation in polymethylmethacrylate// Journal of Physics: Conference Series.- 2015- V.653 - P. 012045.

3. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. 2D modeling of high-speed impact of polymethylmethacrylate plates // Journal of Physics: Conference Series. - 2016. – V. 774 – P. 012066.
4. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Моделирование распространения ударных волн по полиметилметакрилату. // Известия Кабардино – Балкарского государственного университета. – 2014 – Т.4 - №3 – с.109-114.
5. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Затухание импульсов ударного сжатия в полиметилметакрилате // Челябинский физико-математический журнал. – 2017- Т.2 - №4 – с.456-468.

Статьи в других изданиях

1. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Динамическая деформация ПММА: влияние вязкоупругих свойств // Челябинский физико-математический журнал. – 2016. – Т. 1. – В. 3. – С. 92-107.

Тезисы докладов

1. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Численное исследование распространения ударных волн по полимерным материалам. Тезисы докладов XXVI Международной конференции «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» 28 сентября – 30 сентября, 2015, г. Санкт-Петербург, стр. 263.
2. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Исследование распространения ударных волн в пленках ПММА различной толщины. Тезисы докладов XIX Зимняя школа по механике сплошных сред, 24-27 февраля 2015, г. Пермь, - стр. 249.
3. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Моделирование распространения ударных волн по полимерным материалам. Тезисы докладов XII Международной конференции 2–6 июня 2014, г. Снежинск, стр. 345.
4. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. Numerical investigations of shock wave propagation in polymethylmethacrylate. Book of Abstracts XXX International conference on «Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter» March 1-6, 2015, Elbrus, Kabardino-Balkaria, p. 97.
5. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. 2D моделирование высокоскоростного соударения пластин полиметилметакрилата. Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков, посвященная 100-летию со дня рождения первого ректора БашГУ Ш.Х. Чанбарисова, апрель 26-28, 2016, г. Уфа, стр. 4.
6. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. 2D modeling of high-speed impact of polymethylmethacrylate plates. XXXI International Conference on Equations of State for Matter March 1-6, 2016, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, p.162.
7. Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В. Динамика затухания ударного импульса алюминии и полиметилметакрилате. Тезисы докладов XIII Международной конференции 20-24 марта, 2017, г. Снежинск, стр. 216.
8. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V., Comparative study of shock pulse evolution in aluminum and polymethylmethacrylate. XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, p.144

Список литературы

- 1 Канель, Г.И. Необычные пластичность и прочность металлов при ультракоротких длительностях нагрузки / Г.И. Канель, Е.Б. Зарецкий, С.В. Разоренов, С.И. Ашитков, В.Е. Фортов // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 5. – С. 525–545.
- 2 Kanel, G.I. Deformation resistance and fracture of iron over a wide strain rate range / G.I. Kanel, S.V. Razorenov, G.V. Garkushin, S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, M.B. Agranat // Physics of the Solid State. – 2014. – V. 56, N 8. – P. 1569–1573.
- 3 Иногамов, Н.А. Сверхупругость и распространение ударных волн в кристаллах / Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, В.В. Шепелев // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93. – В. 4. – С. 245-251.
- 4 Mayer, A. E. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading / A.E. Mayer, K. V. Khishchenko, P.R. Levashov, P.N. Mayer // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113, N 19. – P.193508.
- 5 Абросимов, С.А. Исследование механических свойств алюминия, сплава АМГ6М и полиметилметакрилата при высоких скоростях деформирования под действием лазерного излучения пикосекундной длительности / С.А. Абросимов, А.П. Бажулин, В.В. Воронов, И.К. Красюк, П. П. Пашинин, А.Ю. Семенов, И.А. Стучебрюхов, К.В. Хищенко // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 442, № 6. – С. 752–754.
- 6 Абросимов, С.А. Особенности поведения вещества в области отрицательных давлений, создаваемых действием лазерного импульса пикосекундной длительности / С.А. Абросимов, А.П. Бажулин, В.В. Воронов, А.А. Гераськин, И.К. Красюк, П.П. Пашинин, А.Ю. Семенов, И.А. Стучебрюхов, К.В. Хищенко, В.Е. Фортов // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 3. – С. 246–251.
- 7 Иногамов, Н.А. Динамика абляции золота в воду / Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 154. – В. 1 (7). – С. 92-123.
- 8 Анисимов, С.И. Разлет вещества и формирование кратера под действием ультракороткого лазерного импульса / С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, К. Нишихара, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2006. – Т. 130. – В. 2. – С. 212-227.
- 9 Ломовской, В.А. Релаксационные явления в полиметилметакрилате / В.А. Ломовской // Тонкие химические технологии. – 2015. – Т.10, №3. – С. 5-49.
- 10 Ломоносов, И.В. Модель широкодиапазонных уравнений состояния полимерных материалов при высоких плотностях энергии / И.В. Ломоносов, В.Е. Фортов, К.В. Хищенко // Хим. физика. – 1995. – Т.14. – № 1. – С. 47-52
- 11 Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т. VI Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука. – 1988. – С. 736
- 12 Selyutina, N. The definition of characteristic times of plastic relaxation by dislocation slip and grain boundary sliding in copper and nickel / N. Selyutina, E.N. Borodin, Y. Petrov, A.E. Mayer // Int. J. Plast. – 2016. – V. 82. – P. 97–111.
- 13 Krasnikov, V.S. Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum / V.S. Krasnikov, A.E. Mayer // Int. J. Plast. – 2018. – V. 101. – P.170-187.
- 14 Яловец, А.П. Расчёт течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц / А.П. Яловец // ПМТФ. – 1997. – № 1. – С. 151-166.
- 15 Barker, L.M. Shock-Wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sapphire. / L.M. Barker, R.E. Hollenbach // Journal of Applied Physics. – 1970. –V. 41. – № 10. – P. 4208-4226.
- 16 Мержиевский, Л.А. Моделирование ударно-волнового деформирования полиметилметакрилата / Л.А. Мержиевский, М.С. Воронин // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 113–123.

- 17 Мержиевский, Л.А. Моделирование деформирования и разрушения полимеров на основе максвелловского подхода/ Л.А. Мержиевский, М.С. Воронин // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 1–1. – С. 95–98.
- 18 Farshad, M. Determination of shear modulus and Poisson's ratio of polymers and foams by the anticlastic plate-bending method / M. Farshad, M.W. Wildenberg, P. Flieler // Materials and Structures. – 1997. – V. 30. – P. 377–382.
- 19 McQueen, R.G. The equation of state of solids from shock wave studies / R.G. McQueen, S.P. Marsh, J.W. Taylor, J.N. Fritz, W.J. Carter. // High Velocity Impact Phenomena. / Ed. Kinslow R. New-York: Academic Press. – 1970. – P. 293–417.
- 20 van Thiel, M. Compendium of Shock Wave Data. Compendium Index/ M. Van Thiel, J. Shaner, E. Salinas// Lawrence Livermore National Lab. – 1977. – P. 528–539.
- 21 Marsh, S.P. LASL Shock Hugoniot Data / S.P. Marsh // Berkeley: Univ. California Press. – 1980.
- 22 Trunin, R.F. Shock compressibility of condensed matters in strong shock waves caused by underground nuclear explosions // Physics–Uspekhi. – 1994. – V. 37. – № 11. – P. 1215–1237.
- 23 Zaretsky, E.B. Effect of temperature, strain, and strain rate on the flow stress of aluminum under shock-wave compression / E.B. Zaretsky and G.I. Kanel // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 112, N 7. – P. 073504.