

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Ильницкий Денис Константинович

**Численное моделирование процессов деформации и разрушения
материалов при импульсных нагрузках**

Специальность 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова"

Научный руководитель:

Иногамов Наиль Алимович

доктор физико-математических наук

Институт теоретической физики РАН им. Л.Д. Ландау, в.н.с

Официальные оппоненты:

Груздков Алексей Андреевич

доктор физико-математических наук

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), заведующий кафедрой математики

Стегайлов Владимир Владимирович

доктор физико-математических наук, доцент

Объединенный институт высоких температур РАН, заведующий отделом

Пшеничников Сергей Геннадиевич

доктор физико-математических наук, доцент

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, в.н.с.

Защита состоится «29» ноября 2019 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.01.14 Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

E-mail: chist206@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ им. М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС "Истина": <http://istina.msu.ru/dissertations/205874199/>

Автореферат разослан « _____ » 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.01.14,

кандидат физико-математических наук

Чистяков Пётр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации рассматривается численное моделирование процессов деформации и разрушения материалов при импульсных нагрузках. Изучаются процессы, происходящие при воздействии на металлы ультракороткого лазерного излучения, при взаимодействии нагретых тонких металлических пленок со стеклянными подложками, а также пластическая деформация энергетических материалов (взрывчатые вещества (ВВ), пороха, пиротехнические составы) при слабоинтенсивном механическом воздействии на них.

Актуальность темы исследования

Изучение процессов, происходящих в конденсированных материалах, под действием импульсных нагрузок имеет важное практическое значение. С их помощью осуществляется большое количество технологических процессов, таких как: обработка материалов, сварка, сверление, формирование поверхностей, упрочнение, разрушение и инициирование взрывчатых превращений в энергетических материалах. Такие нагрузки часто встречаются в повседневной эксплуатации различных конструкций, поэтому описание поведения материалов при подобных воздействиях важно для различных приложений. С точки зрения фундаментальной науки изучение поведения вещества под действием мощных импульсных воздействий, таких как ударные волны, также представляет большой интерес. Ударные волны переводят материал в сильно сжатое состояние, позволяют достичь высоких скоростей деформации и вызывать фазовые переходы и полиморфные превращения в нем. Генераторами ударных волн обычно выступают взрывчатые вещества либо металлические пластины, разогнанные ими и соударяющиеся с мишенью. Такие импульсные нагрузки характеризуются давлениями порядка до сотен и тысяч ГПа и длительностями от десятков наносекунд и более. Изобретение лазеров позволило сократить время воздействия импульса до субпикосекундного диапазона и улучшить пространственно-временные масштабы диагностики изучаемых процессов, при этом достигаемые давления получаются порядка сотен ГПа.

В данной работе рассматриваются два типа импульсных нагрузок: ультракороткий лазерный импульс и механический удар телом,двигающимся со скоростью порядка десятков и сотен метров в секунду.

Ультракороткий (субпикосекундный) лазерный импульс примечателен тем, что позволяет вложить огромную энергию в материал за очень короткий временной промежуток. За время воздействия импульса не успевает происходить выравнивание энергий между электронной и ионной подсистемами (время выравнивания порядка пикосекунд). При этом по отдельности и электроны, и ионы находятся в тепловом равновесии, поэтому для каждой подсистемы можно ввести свою температуру. Нагреваемое вещество находится в сильно неравновесном состоянии, в англоязычной литературе называемом устоявшимся термином Warm Dense Matter (теплое(либо горячее) плотное вещество - плотность порядка твердотельной, а температура порядка единиц эВ ($1 \text{ электронвольт} \approx 11600 \text{ К}$) - а в нашем случае еще более тонкая разновидность этого состояния - сильно нагретый электронный газ и холодная ионная решетка). При ультракоротком лазерном воздействии в нем происходит целый каскад процессов: сильный нагрев электронной подсистемы, перенос тепла вглубь образца за счет электронной теплопроводности, нагрев ионной подсистемы за счет электрон-ионного теплообмена, и затем, после окончания электрон-ионной релаксации (выравнивание температур), упруго-пластические деформации и откольные явления в ионной подсистеме, и для корректного описания этих явлений требуется учет всех вышеописанных процессов.

В диссертационной работе рассматривается поведение ионной подсистемы при воздействии ультракороткого лазерного импульса. Этот импульс создает ударную волну, которая переводит вещество в односно деформированное состояние. Длительность нахождения материала в сжатом состоянии обычно порядка нескольких десятков пикосекунд. За это время оно не успевает вызвать движение дислокаций, а, соответственно, пластической деформации. Наблюдается своеобразное явление: распространение упругих волн с большой амплитудой порядка десяти ГПа. Эта картина сильно отличается от привычной, когда при микросекундном импульсном воздействии (например, механический удар) достаточной амплитуды по мишени бежит

упругий предвестник амплитудой порядка десятой части ГПа, а за ним сильная пластическая волна. Впервые упругие волны большой амплитуды были получены экспериментально в работах [1, 2]. Тогда исследователи хотя и экспериментально зафиксировали скорости, соответствующие распространению упругих, а не ожидаемых в рамках привычных представлений пластических волн, объяснили наблюдаемое различие несовершенством измерительной техники либо процессами, приводящими к выходу из строя экспериментальной аппаратуры. В дальнейшем, к этому вопросу вернулись в работах [3, 4, 5, 6, 7]. В работе [5] проводилось моделирование эксперимента по лазерному воздействию на алюминиевую мишень методом молекулярной динамики, а в работе [4] экспериментально измеряли скорости распространения ударных волн, и окончательно убедились в существовании упругих волн большой амплитуды.

Метод молекулярной динамики широко используется для описания поведения процессов происходящих при высокоскоростных деформациях материалов и обладает хорошей точностью. Но имеет и некоторые недостатки, во-первых он очень трудоемкий и требует наличия больших вычислительных ресурсов, во-вторых позволяет моделировать поведение системы только достаточно малого размера (1 мкм в одном измерении), а в третьих не может учитывать в рассматриваемых задачах такие процессы как нагрев электронного газа, электронную теплопроводность, электрон-ионный теплообмен и т.д. В связи с этим возникла необходимость описания упругих волн большой амплитуды при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на монокристаллы металлов в рамках механики сплошной среды, что позволило бы достаточно быстро рассчитывать все эти явления с учетом поведения электронной подсистемы. Хотя двухтемпературная модель для описания процессов, происходящих при воздействии лазерного импульса на вещество известна достаточно давно, в ней обычно полностью игнорировалось описание упруго-пластических свойств материалов, поэтому и необходимо было восполнить этот пробел, с условием того, что экспериментально наблюдалось упругое поведение материи при таком нагружении.

Ультракороткие лазерные импульсы также широко используются в различных технологических процессах для модификации поверхностей и формирования различных поверхностных наноструктур. К наиболее известным приложениям относятся:

формирование решеток из полых бугорков на поверхности пленки; структурирование пленок для биоприложений и микроэлектроники; получение миниатюрных струй для усиления электрического поля, которые получаются при выплескивании расплавленного металла и последующим их охлаждением, и т.д. [16]-[20]. Для теоретического описания этих процессов необходимо учитывать взаимосвязанные тепловые и механические явления, которые могут приводить к вскипанию, плавлению и рекристаллизации расплавленных металлов, появлению упругих волн большой амплитуды, внутренним повреждениям материалов и т.д. Образование растягивающих напряжений внутри фронтального слоя, нагретого лазером, имеет важнейшее значение для понимания нуклеации, кавитации и фронтального (со стороны облучающего лазера) откола, которые часто называются абляцией (удаление массы) в лазерной физике. Откол и движение оторванных слоев позволяет объяснить появление интерференционных колец Ньютона [21, 22], возникающих из-за интерференции диагностического лазерного импульса между дном кратера и границами отколовшегося слоя. Разрыв свободной плоской пленки, быстро нагретой лазером, является наиболее простым примером лазерного откола [23]-[29], в котором порог абляции F_a определяет динамику этой пленки. Но возникает другая физически важная проблема, часто возникающая в приложениях: как эта картина меняется в случае пленок, нанесенных на подложку? Хотя некоторые исследователи рассматривали данную проблему в упрощенном варианте аналитическими методами, либо методом молекулярной динамики в приближении абсолютно жесткой подложки, до сих пор не было рассмотрения этой задачи с полным учетом механического поведения стеклянной подложки, ее взаимодействия с металлической пленкой, отрыва пленки от подложки, а также разрушения пленки. Эта проблема рассмотрена в диссертации.

В диссертации также рассматриваются деформации энергетических материалов (взрывчатые вещества, пороха, пиротехнические составы) при достаточно слабых механических воздействиях, например, удар стального шара массой несколько десятков грамм, летящего со скоростью до сотни метров в секунду. Несмотря на слабость таких воздействий, они могут вызвать инициирование взрывчатых превращений в энергетических материалах. Данная задача имеет важное прикладное значение, поскольку

позволяет осуществлять прогноз безопасности конструкций, содержащих взрывчатые вещества к различным механическим воздействиям. Эта проблема достаточно давно изучается разными группами исследователей как экспериментально, так и теоретически [38, 40, 41, 36, 34]. Разработан целый набор тестовых экспериментов [36, 34] для определения степени безопасности конструкций, содержащих ВВ. Обычно для описания инициирования превращений в энергетических материалах используют феноменологические модели с достаточно большим набором плохо определяемых параметров, которые калибруются по результатам экспериментов. Однако до сих пор при построении подобных моделей не учитывалась анизотропия механических свойств отдельных кристаллов ВВ, а также взаимодействие отдельных зерен материала. Хотя учет этих свойств материалов может привести к описанию локализации пластического течения, а ,соответственно, неравномерного нагрева ВВ, которое может инициировать реакции его химического разложения. Возникла задача описания инициирования ВВ низкоскоростным ударом с учетом анизотропии материала. Для нее впервые использовался конечно-элементный метод кристаллической пластичности [39], разработанный для описания квазистатической деформации металлов с учетом анизотропии зерен материала и их взаимодействия друг с другом.

Цели работы

Целью данной диссертационной работы является развитие математических моделей описания поведения материалов под действием импульсных нагрузок, включающих в себя:

- 1) описание поведения монокристаллов металлов при субмикросекундном лазерном воздействии с учетом их упругих свойств
- 2) учет наличия сил адгезии между пленкой и подложкой, а также возможность внутреннего разрушения пленки и ее отрыва от подложки в системах тонкая металлическая пленка-стеклянная подложка, подвергаемых облучению ультракороткими лазерными импульсами
- 3) учет анизотропных свойств отдельных кристаллов энергетических материалов и их взаимодействия друг с другом при механическом нагружении слабой интенсив-

ности.

Положения, выносимые на защиту

1) Для корректного описания распространения упругих волн большой амплитуды в монокристаллах металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов необходимо дополнить существующие двухтемпературные математические модели слагаемыми, учитывающими упругие свойства ионной подсистемы.

2) При облучении ультракороткими лазерными импульсами тонких металлических пленок (10 - 100 нм), расположенных на толстых стеклянных подложках (несколько мкм), существуют три режима движения пленки в зависимости от поглощенной энергии излучения: колебания, отрыв ее целиком и внутреннее разрушение пленки.

3) Инициирование ВВ за счет локализации пластического течения при механических ударах слабой интенсивности возможно моделировать с помощью конечно-элементного метода кристаллической пластичности, который позволяет учитывать анизотропные свойства отдельных кристаллов ВВ, а также их взаимодействие.

Научная новизна работы

Впервые в существующие двухтемпературные математические модели среды, описывающие ультракороткие лазерные воздействия, были добавлены слагаемые, отвечающие за прочностные свойства материалов. Данная модификация позволила описать множество экспериментов по генерации упругих волн большой амплитуды в металлических пленках, что до этого не удавалось сделать в рамках континуального моделирования.

Подробное численное описание влияния стеклянной подложки на динамическое поведение тонкой металлической пленки, находящейся на ней, при ее лазерном облучении с учетом отрыва и разрушения пленки также является новым. Ранее исследования ограничивались аналитическим рассмотрением упрощенных задач либо рассматривались свободные пленки.

Впервые для моделирования инициирования анизотропного ВВ применен конечно элементный метод кристаллической пластичности. Такой подход позволяет рассмотреть напрямую влияние анизотропии кристаллов материалов и их взаимодействия на локализацию пластического течения без введения дополнительных предположений.

Личный вклад

Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно.

Теоретическая и практическая значимость работы

Учет упругих свойств ионной среды в рамках подхода двухтемпературной механики сплошной среды позволяет быстро и точно численно описывать эксперименты по ультракороткому воздействию лазерного излучения на вещество.

Многие технологические процессы модификации поверхностей материалов при их обработке ультракоротким лазерным излучением, проводятся с тонкими пленками из металла, напыленными на диэлектрическую подложку. В рамках подхода механики сплошных сред создана математическая модель, позволяющая описывать различные моды движения этой пленки, в зависимости от вложенной энергии.

При хранении и эксплуатации различных конструкций, содержащих энергетические вещества (твердые ракетные топлива, ВВ) важно учитывать возможность их инициирования механическим ударом небольшой амплитуды. Предложен метод описания данных процессов, учитывающий анизотропию механических свойств отдельных зерен материала и их взаимодействие.

Методология и методы исследования

Исследования основаны на численном решении классических законов сохранения массы, импульса и энергии, законов термодинамики и дополнительном учете законов движения элементарных носителей пластичности (дислокаций).

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертации обусловлена их согласием с экспериментальными данными и результатами моделирования, проведенных методом молекулярной динамики.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XV, XVII и XIX Харитоновских тематических научных чтениях (г. Саров, 2013, 2015, 2017), XI и XII Забабахинских научных чтениях (г. Снежинск, 2012, 2014), 10 Всероссийской школе-семинаре "Аэротермодинамика и физическая механика классических и квантовых систем" (г. Москва, 2016), III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии" (г. Москва, 2017), International Conference on High Energy Density Physics (Франция, г. Сент-Мало, 2013), New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes (Чехия, г. Пардубице, 2014), International Conference "Turbulent Mixing and Beyond-Non Equilibrium Transport across the scales" (Италия, г. Триест, 2017).

Доклады по диссертации в целом были сделаны в 2018-2019 гг. на научных семинарах кафедры газовой и волновой динамики МГУ (рук. академик РАН Нигматулин Р.И.), кафедры теории пластичности МГУ (рук. чл.-корр. РАН Ломакин Е.В.), кафедры механики композитов МГУ (рук. проф. Горбачёв В.И.), кафедры теории упругости МГУ (рук. проф. Георгиевский Д.В.), Научного центра волновых исследований ИОФ РАН (рук. д.ф.-м.н. Шафеев Г.А.) и Центра фундаментальных и прикладных исследований ВНИИА (рук. д.ф.-м.н. Андрияш А.В.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 статей, из них 14 в рецензируемых научных изданиях, цитируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI. Список публикаций приведен в конце автореферата.

В статьях, выполненных в соавторстве и относящихся к первым двум главам дис-

сертации [3] - [17], автору принадлежат все результаты, посвященные численному моделированию поведения материала под действием лазерного излучения в рамках континуального подхода, чему и посвящена настоящая диссертация. Автор также принимал участие в обсуждении полученных результатов и написании этих статей. Остальные соавторы занимались проведением экспериментов, моделированием изучаемых процессов методом молекулярной динамики, получением теплофизических параметров электронной подсистемы, а также табличных уравнений состояний ионной подсистемы, если, конечно, не использовались общепризнанные аналитические зависимости.

В статьях [1], [2], относящихся к третьей главе, автору принадлежит принципиальная идея работ, постановка задачи, математическое моделирование, соавторы принимали участие в обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, изложена на 117 страницах, включает 42 рисунка и библиографию из 79 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дается описание актуальности, достоверности, научной новизны и практической ценности задач, рассматриваемых в работе. Сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию распространения упругих волн большой амплитуды (порядка 1-10 ГПа по сравнению с обычно наблюдаемыми при микросекундном воздействии порядка 0,1 ГПа) в монокристаллах металлов при субпикосекундном лазерном воздействии.

Как известно, упруго-пластические превращения не могут происходить мгновенно, а имеют свое характерное время релаксации τ_p . Если время сжатия меньше времени релаксации $t_c \ll \tau_p$, то материал остается в упругом состоянии. При увеличении прикладываемого давления время релаксации уменьшается τ_p , но остается конечным.

Таким образом, можно ожидать существования в сжатом материале метастабильных упругих состояний выше HEL (упругий предел Гюгонио) пока не произойдет релаксация напряжений за счет пластических переходов.

Создание фемтосекундных лазеров дало мощный инструмент для генерации и изучения сильных ударных волн в материалах. Причем длительность нахождения вещества в одноосном деформированном состоянии после их воздействия очень мала и составляет $t_c \approx 10$ пс, что позволяет реализовать напряжения упругого сжатия намного больше предела текучести в обычных условиях.

Эти упругие волны большой амплитуды наблюдаются экспериментально, а также расчетно описываются с помощью метода молекулярной динамики. В рамках континуальной механики процессы механического движения облучаемой пленки обычно описываются с помощью модели двухтемпературной гидродинамики. Двухтемпературная модель была выбрана, поскольку при фемтосекундном лазерном воздействии материал находится в особом состоянии. В этом состоянии электроны и ионы не успевают выравнивать свои энергии: электронный газ является сильно нагретым, а ионная решетка - холодной. Для правильного описания данного явления необходим учет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена. Все свойства электронного газа и параметры энергетического обмена между электронами и решеткой, используемые в данной работе, получены соавтором диссертанта и подробно описаны в [8]. Эта двухтемпературная модель применяется достаточно давно для подобных систем и хорошо описывает механическое движение облучаемого материала [22].

Однако, применение обычной модели двухтемпературной гидродинамики не позволяет правильно описывать распространение упругих волн, в частности, расчетное время выхода волны сжатия на свободную поверхность металлической пленки получается больше экспериментального на десятки пс. В данной работе для улучшения описания данных процессов предлагается модель двухтемпературной механики сплошной среды с учетом упругих свойств ионной подсистемы. Система уравнений данной модели в одномерном случае, записанная в лагранжевых массовых координатах m

$$dm = \rho dx, m = \int_{x_0}^x \rho dx \quad (1)$$

выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial v}{\partial m} \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial m} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4)$$

$$\frac{dE_e}{dt} + P_e \frac{\partial v}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial m} \left(\kappa_e \rho \frac{\partial T_e}{\partial m} \right) - \frac{\alpha_{ei}}{\rho} (T_e - T_i) + J_L \quad (5)$$

$$\frac{dE_i}{dt} - \sigma_i \frac{\partial v}{\partial m} = \frac{\alpha_{ei}}{\rho} (T_e - T_i) \quad (6)$$

$$\sigma = -P_e + \sigma_i \quad (7)$$

$$\sigma_i = -P_i + s_i \quad (8)$$

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{4}{3} \mu \dot{\epsilon} \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon} = \rho \frac{\partial v}{\partial m}, \quad (10)$$

здесь ρ - плотность материала, v - массовая скорость, σ - полное напряжение, E_e и E_i - удельная внутренняя энергия электронной и ионной подсистем, соответственно, P_e и P_i - давления электронного газа и ионной подсистемы, σ_i - напряжение ионной подсистемы, s_i - девиатор ионной подсистемы, ϵ - относительная деформация, μ - модуль сдвига, x - эйлерова координата, κ_e - коэффициент теплопроводности электронного газа, α_{ei} - коэффициент электрон-ионного теплообмена, J_L - лазерный источник нагрева. Для свободной пленки граничные условия берутся как:

$$\sigma|_L = 0 \quad (11)$$

$$\sigma|_R = 0 \quad (12)$$

$$\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial m} \Big|_L = 0 \quad (13)$$

$$\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial m} \Big|_R = 0, \quad (14)$$

$$(15)$$

равенство нулю напряжений на границах и равенство нулю электронных тепловых потоков. Начальные условия - нулевые напряжения и комнатная равновесная температура. Лазерный источник нагрева брался в виде гауссова по времени и спадающему по экспоненциальному закону по толщине пленки, и соответствовал экспериментам.

Эта задача решалась численно методом конечных разностей с расщеплением по физическим процессам. Был разработан одномерный лагранжев численный код 2T-HD-Elasto-Plast.

Учет упругих свойств ионной решетки позволяет точнее описывать эксперименты по воздействию лазерного излучения на металлы. Результаты сравнения экспериментальных данных с различными методами расчета показаны на Рис. 1,2. Также рассматривались пластические переходы из этого метастабильного упругого состояния. Для этого использовалось уравнение эволюции дислокаций [10, 11] с добавлением слагаемого, учитывающего гомогенное зарождение дислокаций. Это слагаемое было получено в работе [12] методом молекулярной динамики.

С помощью модифицированной модели двухтемпературной сплошной среды, предложенной в этой диссертации, удалось описать большое количество экспериментов. Данный метод позволяет получать предварительные результаты планируемых экспериментов за более короткое время по сравнению с методом молекулярной динамики, который затем используется для более детального описания микроструктуры вещества. Модифицированная модель двухтемпературной сплошной среды также применяется для получения начального профиля температуры для метода молекулярной динамики, поскольку достаточно точно моделирует двухтемпературную стадию до времени релаксации температуры.

Основные результаты этой главы опубликованы в статьях [3], [5], [8], [9], [11], [14], [16], [17].

Вторая глава посвящена описанию поведения тонкой металлической пленки, находящейся на стеклянной подложке, при воздействии ультракороткого лазерного импульса.

В ней рассматривалась золотая пленка с толщиной 10-100 нм, расположенная на толстой (несколько микрометров) стеклянной подложке. Пленка такой толщины быстро нагревается и тепловая энергия распределяется практически равномерно по ее толщине.

Данная задача часто встречается в различных технологических приложениях, поскольку пленку такой толщины удобнее напылять на подложку, а затем ее обрабаты-

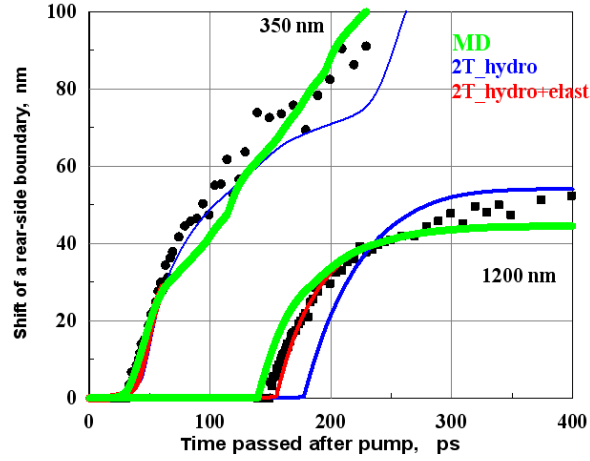


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования. Показана временная зависимость смещения тыльной поверхности алюминиевой пленки для случаев двух ее толщин. Экспериментальные данные - черные точки, результаты МД - зеленые кривые, результаты 2Т-НД - синие кривые, результаты 2Т-НД-Elast - красные кривые.

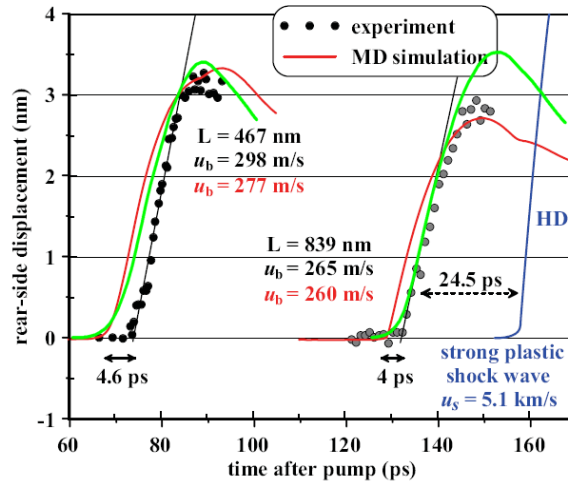


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных [2] с результатами моделирования для двух толщин никелиевой пленки. Показано смещение тыльной стороны пленки. Экспериментальные данные - черные точки, результаты МД - красные кривые, результаты 2Т-НД - синие кривые, результаты 2Т-НД-Elast - зеленые кривые.

вать. В зависимости от вложенной энергии лазерного излучения на поверхности пленки образуются различные наноструктуры: от небольших бугорков до острых наноантенн, и далее, при превышении некоторого порога облучения, образуются сквозные отверстия в пленке. Эти структуры широко используются в нелинейно-оптических приложениях для локального усиления электрического поля и т.д. Знание точных скоростей отлета пленки позволяет масштабировать молекулярно-динамические расчеты и получать итоговую форму застывшей наноструктуры, и затем производить сравнение с экспериментальными данными, что и было сделано на основе этой работы соавторами диссертанта.

В этой главе представлено подробное численное решение задачи нагрева металлической пленки на стеклянной подложке. В [31] было представлено только упрощенное аналитическое решение в акустическом приближении и при условии, что поглощенная энергия излучения была больше порога отрыва пленки от подложки, но меньше порога разрушения пленки.

Задача облучения свободной пленки (которая с двух сторон окружена вакуумом) была рассмотрена во многих работах [23]-[28, 30], начиная с [23]. В [28] эта задача рассматривалась для пленок разных толщин. Здесь мы рассматриваем случай тонких пленок $d_f < d_T$, которые практически однородно нагреваются до начала механического движения. Акустический импеданс золота много больше акустического импеданса стекла [31]. Импеданс вакуума равен нулю. В этом смысле, золотая пленка, расположенная на стекле, подобна свободно расположенной пленке, с небольшой асимметрией, связанной с низким импедансом стекла.

Одномерная математическая модель рассматриваемых процессов в лагранжевых массовых координатах представляется следующей системой уравнений:

для золотой пленки:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial v}{\partial m} \quad (16)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial m} \quad (17)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (18)$$

$$\frac{dE_e}{dt} + P_e \frac{\partial v}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial m} \left(\kappa_e \rho \frac{\partial T_e}{\partial m} \right) - \frac{\alpha_{ei}}{\rho} (T_e - T_i) + J_L \quad (19)$$

$$\frac{dE_i}{dt} - \sigma_i \frac{\partial v}{\partial m} = \frac{\alpha_{ei}}{\rho} (T_e - T_i) \quad (20)$$

$$\sigma = -P_e + \sigma_i \quad (21)$$

$$\sigma_i = -P + s_i \quad (22)$$

$$\frac{ds_i}{dt} + \lambda s_i = \frac{4}{3} \mu \dot{\epsilon}, |s_i| \leq \frac{2}{3} Y \quad (23)$$

$$\dot{\epsilon} = \rho \frac{\partial v}{\partial m} \quad (24)$$

для диэлектрической подложки:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial v}{\partial m} \quad (25)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial m} \quad (26)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (27)$$

$$\frac{dE}{dt} - \sigma \frac{\partial v}{\partial m} = 0 \quad (28)$$

$$\sigma = -P + s \quad (29)$$

$$\frac{ds}{dt} + \lambda s = \frac{4}{3} \mu \dot{\epsilon}, |s| \leq \frac{2}{3} Y \quad (30)$$

$$\dot{\epsilon} = \rho \frac{\partial v}{\partial m} \quad (31)$$

Эти системы дополнялись граничными условиями:

$$\sigma|_L = 0 \quad (32)$$

$$\sigma|_R = 0 \quad (33)$$

$$\sigma|_{C-0} = \sigma|_{C+0} \quad (34)$$

$$\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial m}|_L = 0 \quad (35)$$

$$\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial m}|_C = 0, \quad (36)$$

$$(37)$$

где L - левая (облучаемая) граница металла, R - правая (свободная) граница подложки, C - контакт металл – диэлектрик.

Для описания разрушения золота использовались результаты МД моделирования кавитационных полостей растянутого ($p < 0$) расплава [28], которые затем аппроксимировались аналитической формулой для использования в континуальных расчетах.

Упруго-пластические свойства материалов моделировались с помощью теории Прандтля-Рейсса. Для диэлектрической подложки использовалась классическая однотемпературная система уравнений механики сплошной среды без учета теплопроводности, поскольку на нее нет непосредственного воздействия лазера и коэффициент обычной теплопроводности очень мал, чтобы вызывать перераспределение тепла за пикосекундные времена, соответствующие механическому движению системы. Также учитывалась конечная сила адгезии между стеклом и металлом на контакте.

Данная система уравнений решалась численно методом конечных разностей с расщеплением по физическим процессам.

Порог абляции F_a для случая свободной пленки имеет ясный физический смысл - флюенс (поверхностная плотность поглощенной энергии), при котором пленка разрывается пополам [23]-[25], [27], [28], [30]. В нашем случае этот порог F_a слегка выше, чем в случае свободной пленки, поскольку волна разрежения бегущая от контакта золото-стекло слабее, чем в случае свободной границы. Это ослабление связано с малым, но не равным нулю импедансом стекла.

При вложенной энергии между двумя пороговыми энергиями F_s и F_a появляется конечная скорость движения центра масс улетающей пленки. Она тоже возникает из-

за асимметрии границ, поскольку в симметричном случае свободной пленки скорость движения пленки как целого равна нулю. Из-за малости асимметрии скорость центра масс намного меньше (произведение акустических импедансов, см. [31]), чем скорость колебаний свободной пленки равной толщины и при одинаковой вложенной энергии.

В итоге получается, что в зависимости от поглощенной пленкой энергии F_{abs} , возможны три режима ее движения. Они разделяются между собой двумя пороговыми значениями F_s и F_a . Ниже первого порога (порог деламинации - отрыва пленки от подложки) F_s пленка остается на подложке. Амплитуда этого порога определяется силой адгезии между пленкой и стеклом. Между двумя порогами F_s и F_a пленка отслаивается от подложки. Она отслаивается целиком. Выше порога F_a пленка разрушается. Более того, ее разрыв происходит раньше, чем волна разгрузки достигает контакта металл-стекло.

На Рис. 3 показан колебательный режим движения пленки. На Рис. 4 представлен момент деламинации пленки от подложки. На Рис. 5 и 6 приведены результаты моделирования внутреннего откола золотой пленки.

Основные результаты этой главы опубликованы в статьях [6], [7], [10], [15], [17], [4].

Третья глава посвящена описанию инициирования анизотропного ВВ за счет локализации пластической деформации, причем для описания этого процесса используется конечно элементный метод кристаллической пластичности.

Безопасность различных изделий, содержащих в своем составе взрывчатые вещества (ВВ), а также другие составы, способные к выделению энергии, например, ракетные топлива, во многом определяются реакцией данных материалов на различные ударные нагрузки. Эти нагрузки могут быть как высокоинтенсивные (более 10 ГПа), так и слабоинтенсивные (менее 1 ГПа). В то время как для высокоинтенсивных нагрузок существуют феноменологические модели детонации ВВ (Lee-Tarver [32], Forest Fire [33], МК [35] и т. д.), широко применяемые в инженерных расчетах, для слабоинтенсивных воздействий нет общепринятой модели возбуждения и распространения детонации. Хотя они достаточно интенсивно изучаются экспериментально для определения безопасности их использования (Рис. 7). Это связано, в

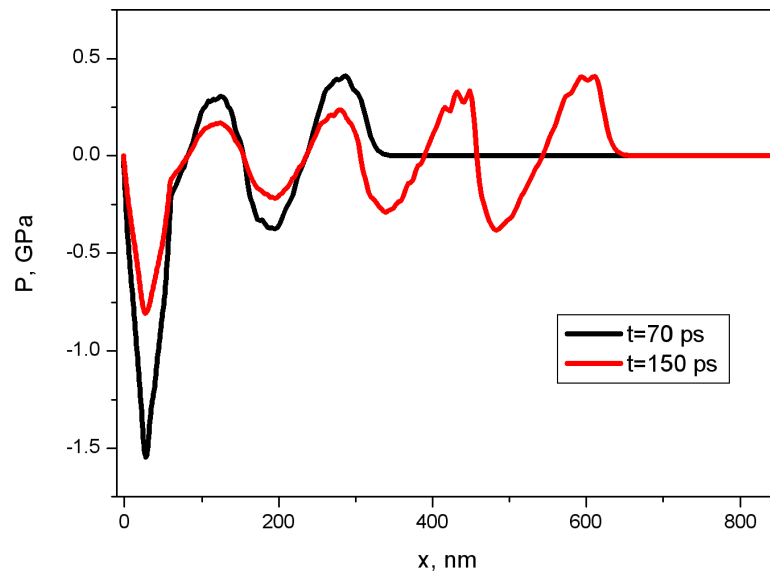


Рис. 3. Профили полных давлений на моменты времени 70 и 150 пс при флюенсе 2.5 мДж/см². Колебательный режим. Пленка остается на подложке.

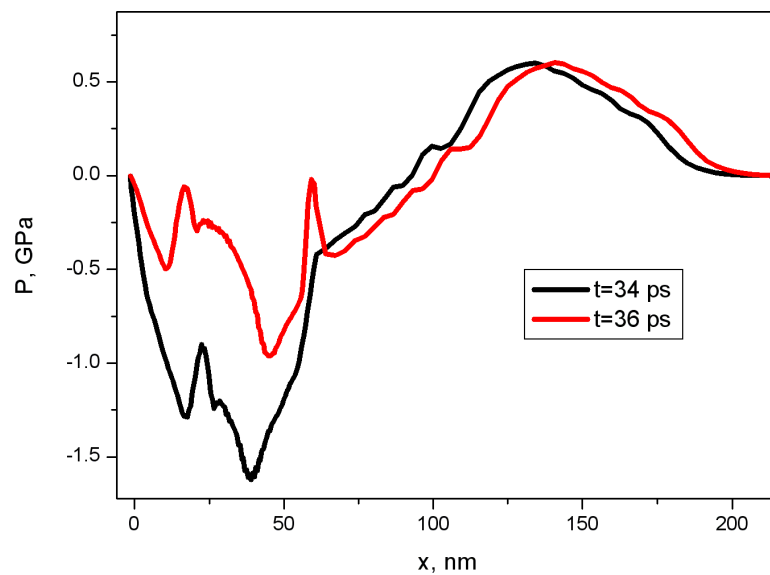


Рис. 4. Профили полных давлений на моменты времени 34 и 36 пс при флюенсе 7,5 мДж/см². Наблюдается отрыв золотой пленки от стекла.

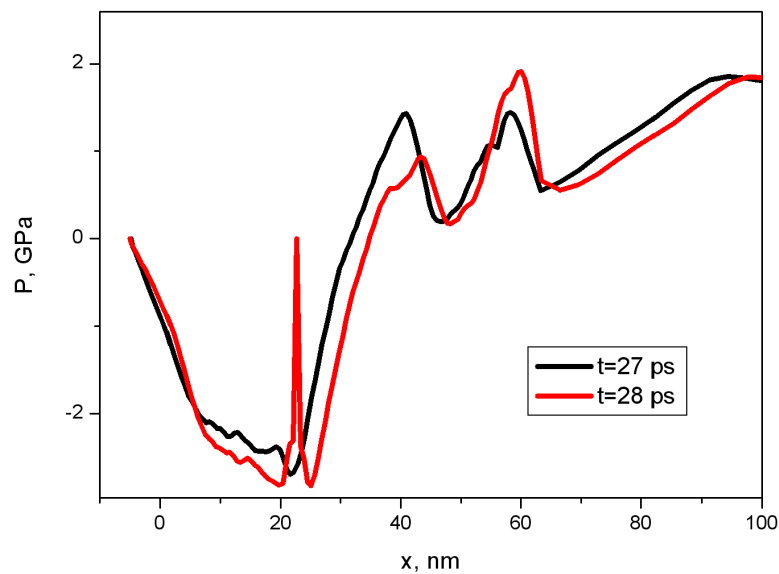


Рис. 5. Профили полных давлений на моменты времени 27 и 28 пс при флюенсе 25 мДж/см².

Наблюдается откол в золотой пленке.

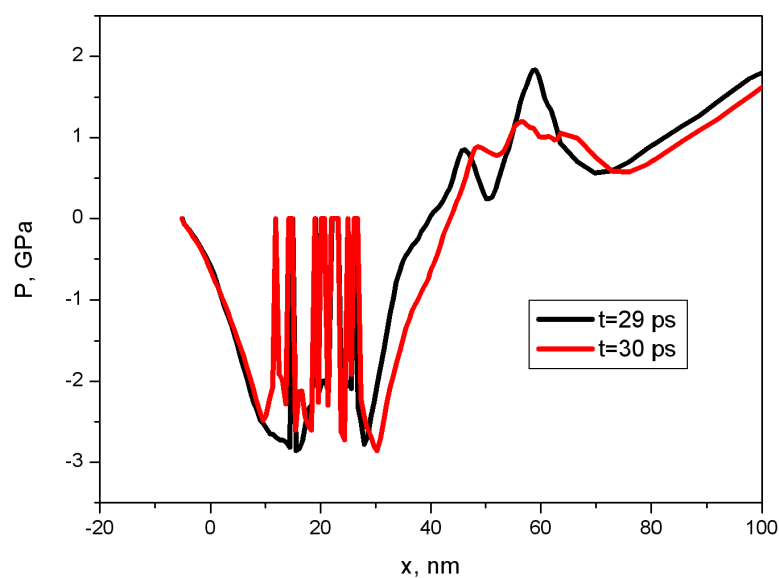


Рис. 6. Профили полных давлений на моменты времени 29 и 30 пс при флюенсе 25 мДж/см².

Наблюдается множественный откол в золотой пленке.

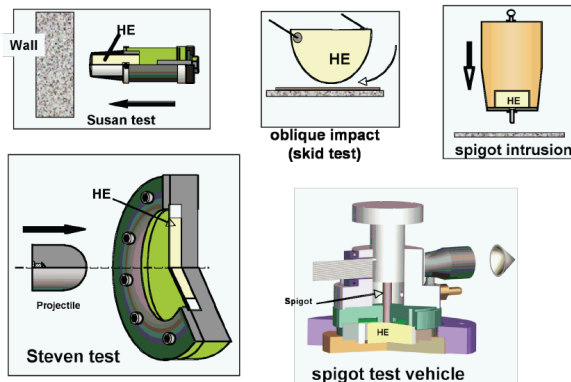


Рис. 7. Схема экспериментов по низкоинтенсивному воздействию на энергетические материалы [36].

основном, с многофакторностью и многомасштабностью изучаемого явления и сложностью выделения определяющего физического процесса, поскольку существует множество причин возникновения очагов детонации (гетерогенность ВВ, неустойчивость процесса его деформирования, трение зерен ВВ и т. д.). По мнению некоторых исследователей (например, [37], [38]) основной причиной сильно неоднородного нагрева ВВ является образование адиабатических полос сдвига при его сдвиговом нагружении. Существует несколько феноменологических моделей описания данного процесса, они рассматриваются в первых двух разделах этой главы. Основной слабостью данного подхода является использование множества плохо определяемых параметров, которые в дальнейшем подбираются для описания экспериментальных данных.

Для прояснения физической картины явления необходимо получить в явном виде образование неоднородных зон нагрева ВВ без вспомогательных упрощений. В данной главе было предложено учесть анизотропию механических свойств зерен ВВ и их взаимодействие между собой, что до сих пор при описании низкоинтенсивных воздействий не было исследовано. В то время как, хорошо известно, что даже отдельный кристалл ВВ имеет существенно анизотропные свойства, а чувствительность к механическим воздействиям агломерата зерен ВВ сильно зависит от размеров этих зерен.

Для этого рассматривалось нагружение ВВ с учетом анизотропной ориентации составляющих его кристаллов и их взаимодействия между собой. Использовался ко-

нечно элементный метод кристаллической пластичности [39], который изначально был разработан для расчета квазистатических деформаций металлов. В каждой расчетной точке конечного элемента рассчитывалось поведение десяти случайно ориентированных зерен материала. Отклик каждого из которых с помощью различных процедур гомогенизации сводился к единому значению отклика в каждой расчетной точке. В данном методе используется декомпозиция градиента деформации $\mathbf{F}$ на множители:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_p. \quad (38)$$

Пластическая деформация изменяется как

$$\dot{\mathbf{F}} = \mathbf{L}_p \mathbf{F}_p, \quad (39)$$

здесь $\mathbf{F}_e$ - упругая часть градиента деформации, $\mathbf{F}_p$ - пластическая часть градиента деформации, $\mathbf{L}_p$ - градиент скорости пластической деформации.

В случае пластичности, связанной только со скольжением дислокаций

$$\mathbf{L}_p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\alpha \mathbf{m}^\alpha \otimes \mathbf{n}^\alpha, \quad (40)$$

где вектора $\mathbf{m}^\alpha$ и $\mathbf{n}^\alpha$ - единичные вектора, описывающие направление скольжения и нормаль к плоскости скольжения для системы скольжения α и N - число систем скольжения, $\dot{\gamma}^\alpha$ - скорость сдвига для данной системы.

Для каждой плоскости скольжения зерна были внедрены дислокационные модели упруго-пластического поведения материалов в виде феноменологической модели движения дислокаций [39]:

$$\dot{\gamma}^\alpha = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^\alpha}{\tau_c^\alpha} \right|^n \text{sgn}(\tau^\alpha), \quad (41)$$

где $\dot{\gamma}^\alpha$ - скорость деформации в плоскости скольжения α под действием приведенного сдвигового напряжения τ^α при сопротивлении сдвигу τ_c^α , $\dot{\gamma}_0$ и n - параметры материала, определяющие начальную скорость деформации и чувствительность сдвига к скорости деформации, соответственно. Влияние любой другой системы скольжения β на упрочнение системы α дается выражением:

$$\dot{\tau}_c^\alpha = h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^\beta|, \quad (42)$$

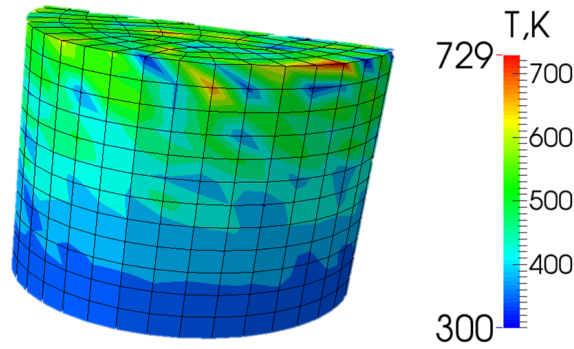


Рис. 8. Температура на момент времени 4 мкс.(К)

где $h_{\alpha\beta}$ - матрица упрочнения:

$$h_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} \left[h_0 \left(1 - \frac{\tau_c^\beta}{\tau_s} \right) \right]. \quad (43)$$

Все эти уравнения решались численно. Модуль, содержащий программную реализацию алгоритма их решения, связывался посредством пакета прикладных программ DAMASK (Dusseldorf Advanced MAterial Simulation Kit), который также был модифицирован в процессе работы, с конечно элементным решателем LS-DYNA.

Получена локализация пластического течения и нагрев достаточный для инициирования ВВ. Для оценки степени химического превращения материала использовалась кинетика выгорания Аррениуса. Получено начало взрывных превращений в условиях близким к экспериментальным данным. На Рис. 8 и 9 показаны достигаемые температура и степень выгорания цилиндра ВВ при его деформации за счет движения его верхней плоскости со скоростью 100 м/с.

Основные результаты этой главы опубликованы в статьях [1], [2].

В **Заключении** кратко сформулированы результаты выполнения настоящей работы.

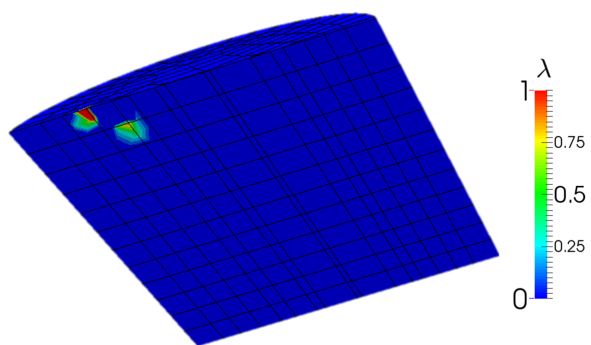


Рис. 9. Выгорание ВВ на момент времени 4 мкс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Основные результаты выполненной работы заключаются в следующем:

- доработана модель двухтемпературной сплошной среды с учетом упругих свойств ионной подсистемы, что позволяет правильно описывать экспериментальные данные по ультракороткому лазерному облучению монокристаллов металлов

- для систем тонкая металлическая пленка-стеклянная подложка учтена сила адгезии между ними и порог разрушения пленки, зависящий от растягивающих напряжений и температуры, что позволяет точнее описывать режимы поведения данной системы при субпикосекундном лазерном воздействии

- для описания инициирования энергетических материалов при слабых механических воздействиях впервые применен конечно элементный метод кристаллической пластичности, который позволяет учесть анизотропные свойства отдельных зерен материала и их взаимодействие между собой

Благодарности

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность научному руководителю ВНИИА А.В. Андрияшу, своему непосредственному руководителю С.Е. Куратову, научному руководителю диссертационной работы Н.А. Иногамову, своим коллегам В.В. Жаховскому, К.П. Мигдалу, С.А. Дьячкову, К.Е. Городничеву, П.П. Захарову, соавторам В.А. Хохлову и Ю.В. Петрову, профессору А.Б. Киселеву, а также своим оппонентам А.А. Груздкову, С.Г. Пшеничному и В.В. Стегайлову.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых для защиты в диссертационном совете МГУ

1) D. Ilnitsky, N. Inogamov, V. Zhakhovsky, Response of explosive HMX to low-velocity impact: modeling by the crystal plasticity finite element method J. Phys.: Conf. Ser. 941(1):012052 (2018) (SJR журнала в базе Scopus - 0.221)

2) D. Ilnitsky, S. Dyachkov, N. Inogamov, V. Zhakhovsky, Mechanical anisotropy of energetic polycrystals as possible initiation mechanism, J. Phys.: Conf. Ser. 1147:012040 (2019) (SJR журнала в базе Scopus - 0.221)

3) S. Grigoryev, B. Lakatos, M. Krivokorytov, V. Zhakhovsky, S. Dyachkov, D. Ilnitsky, K. Migdal, N. Inogamov, A. Vinokhodov, V. Kompanets, Yu. Sidelnikov, V. Krivtsun, K. Koshelev, V. Medvedev, Expansion and Fragmentation of a Liquid-Metal Droplet by a Short Laser Pulse, Physical Review Applied, 10(6)(2018) (Импакт-фактор журнала в базе Web of Science - 4.532)

4) D.K. Ilnitsky, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, Dynamics of laser ablation at the early stage during and after ultrashort pulse, J. Phys.: Conf. Ser. 774:012101 (2016) (SJR журнала в базе Scopus - 0.221)

5) D.K. Ilnitsky, V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, K.V. Khishchenko, K.P. Migdal, S.I. Anisimov, Two-temperature hydrodynamics of laser-generated ultrashort shock waves in elasto-plastic solids, J. Phys. Conf. Ser. 500:032021 (2014) (SJR журнала в базе Scopus - 0.221)

6) N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, Y.V. Petrov, V.V. Zhakhovsky, K.P. Migdal, D.K. Ilnitsky, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Yamagiwa, M. Ishino, T. Kawachi, A.Y. Faenov, T.A. Pikuz, M. Baba, Y. Minami and T. Suemoto, Rarefaction after fast laser heating of a thin metal film on a glass mount, AIP Conf. Proc, 1793, 070012 (2017) (SJR журнала в базе Scopus - 0.182)

7) V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal,

V.V. Shepelev, Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation, AIP Conf. Proc, 1793, 100038 (2017) (SJR журнала в базе Scopus - 0.182)

8) Bruno Albertazzi, Norimasa Ozaki, Vasily Zhakhovsky, Anatoly Faenov, Hideaki Habara, Marion Harmand, Nicholas Hartley, Denis Ilnitsky, Nail Inogamov, Yuichi Inubushi, Tetsuya Ishikawa, Tetsuo Katayama, Takahisa Koyama, Michel Koenig, Andrew Krygier, Takeshi Matsuoka, Satoshi Matsuyama, Emma McBride, Kirill Petrovich Migdal, Guillaume Morard, Haruhiko Ohashi, Takuo Okuchi, Tatiana Pikuz, Narangoo Purevjav, Osami Sakata, Yasuhisa Sano, Tomoko Sato, Toshimori Sekine, Yusuke Seto, Kenjiro Takahashi, Kazuo Tanaka, Yoshinori Tange, Tadashi Togashi, Kensuke Tono, Yuhei Umeda, Tommaso Vinci, Makina Yabashi, Toshinori Yabuuchi, Kazuto Yamauchi, Hirokatsu Yumoto and Ryosuke Kodama, Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress, Science Advances, vol. 3, no. 6(2017) (Импакт-фактор журнала в базе Web of Science - 11.5)

9) K.P. Migdal, Yu.V. Petrov, D.K. Il'nitsky, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, K.V. Khishchenko, D.V. Knyazev, P.R. Levashov, Heat conductivity of copper in two-temperature state, Appl. Phys. A 122(4), 408 (2016) (Импакт-фактор журнала в базе Web of Science - 1.784)

10) S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, A.A. Yurkevich, D.K. Ilnitsky, N.A. Inogamov, M.B. Agranat, Ablation of gold irradiated by femtosecond laser pulse: Experiment and modeling, J. Phys.: Conf. Ser. 774, 012097 (2016) (SJR журнала в базе Scopus - 0.221)

11) N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Yamagiwa, M. Ishino, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, D.K. Ilnitsky, T.A. Pikuz, S. Takayoshi, T. Tomita, T. Kawachi, Hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse: simulations and the optical pump—X-ray probe experiment, Appl. Phys. B 119(3), 413-419 (2015) (Импакт-фактор журнала в базе Web of Science - 1.769)

12) N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Y.V. Petrov, V.A. Khokhlov, S.I. Ashitkov, K.V. Khishchenko, K.P. Migdal, D.K. Ilnitsky, Y.N. Emirov, P.S. Komarov, C.W. Miller, I.I. Oleynik, M.B. Agranat, A.V. Andriyash, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Electron-Ion Relaxation, Phase Transitions, and Surface Nano-Structuring Produced by Ultrashort

Laser Pulses in Metals, Contrib. Plasma Phys., 53(10), 796-810 (2013) (Импакт-фактор журнала в базе Web of Science - 1.234)

13) N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Y.V. Petrov, V.A. Khokhlov, S.I. Ashitkov, K.P. Migdal, D.K. Ilitsky, Y.N. Emirov, K.V. Khishchenko, P.S. Komarov, V.V. Shepelev, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, I.I. Oleynik, V.E. Fortov, Ultrashort laser-matter interaction at moderate intensities: two-temperature relaxation, foaming of stretched melt, and freezing of evolving nanostructures, Proc. SPIE, 9065, 906502 (2013) (SJР журнала в базе Scopus - 0.238)

14) Н.А. Иногамов, В. В. Жаховский, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, С.И. Ашитков, К.П. Мигдал, Д. К. Ильницкий, Ю.Н. Эмиров, П.С. Комаров, М.Б. Агранат, С.И. Анисимов, В.Е. Фортов, Действие ультракороткого лазерного импульса на металлы: двухтемпературная релаксация, вспенивание расплава и замораживание разрушающейся нанопены, Оптический журнал, 81(5), 5-26 (2014) (Импакт-фактор журнала в базе РИНЦ - 0.703)

Другие научные труды

15) V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.V. Shepelev, D.K. Ilitsky, Thin 10-100 nm film in contact with substrate: Dynamics after femtosecond laser irradiation, J. Phys.: Conf. Ser. 653, 012003 (2015) (SJР журнала в базе Scopus - 0.221)

16) K.P. Migdal, D.K. Ilitsky, Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, Equations of state, energy transport and two-temperature hydrodynamic simulations for femtosecond laser irradiated copper and gold, J. Phys.: Conf. Ser. 653, 012086 (2015) (SJР журнала в базе Scopus - 0.221)

17) Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, К.В. Хищенко, Ю.В. Петров, Д.К. Ильницкий, К.П. Мигдал, Роль геометрических параметров при фемтосекундной лазерной абляции, Физико-химическая кинетика в газовой динамике, т. 15, вып. 5 (2014)

Литература

- [1] *R. Evans, A. Badger, F. Fallies, M. Mahdiah et al.*, Time- and Space-Resolved Optical Probing of Femtosecond-Laser-Driven Shock Waves in Aluminium, *Phys. Rev. Lett.*, 77, 16, 1996.
- [2] *K.T. Gahagan, D.S. Moore, David J. Funk, R.L. Rabie et al.*, Measurement of Shock Wave Rise Times in Metal Thin Films, *Phys. Rev. Lett.*, 85, 15, 2000.
- [3] *М.Б. Агранат, С.И. Анисимов, С.И. Ашитков, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов и др.*, Прочностные свойства расплава алюминия в условиях экстремально высоких темпов растяжения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов, *Письма в ЖЭТФ*, том 91, вып. 9, с. 517-523, 2010.
- [4] *S.I. Ashitkov, M.B. Agranat, G.I. Kanel, P.S. Komarov, V.E. Fortov*, Behavior of Aluminium near an Ultimate Theoretical Strength in Experiments with Femtosecond Laser Pulses, *JETP Lett.*, Vol. 92, № 8, 516-520, 2010.
- [5] *В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов*, Упруго-пластические явления в ультракоротких ударных волнах, *Письма в ЖЭТФ*, том 92, вып. 8, с. 574-579, 2010.
- [6] *Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, В.В. Шенелев*, Сверхупругость и распространение ударных волн в кристаллах, *Письма в ЖЭТФ*, том 93, вып. 4, с. 245-251, 2011.
- [7] *V.H. Whitley, S.D. McGrane, D.E. Eakins, C.A. Bolme, D.S. Moore, J.F. Bingert*, The elastic-plastic response of aluminium films to ultrafast laser-generated shocks, *J. of App. Phys.*, 109, 013505, 2011.

- [8] *К.П. Мигдал*, Термодинамические и кинетические свойства металлов с возбужденной электронной подсистемой, Дисс. на соиск. ст. канд. физ.-мат. наук, ОИВТ РАН, Москва, 2018.
- [9] *A. Loveridge-Smith, A. Allen, J. Belak et al*, Anomalous Elastic Response of Silicon to Uniaxial Shock Compression on Nanosecond Time Scales, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 2349-2352, 2001.
- [10] *Г.А. Малыгин*, Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов, *УФН*, Том 169, №9.
- [11] *В.С. Красников, А.Ю. Куксин, А.Е. Майер, А.В. Янилкин*, Пластическая деформация при высокоскоростном нагружении алюминия: многомасштабный подход, *ФТТ*, том 52, вып. 7, 2010.
- [12] *Г.Э. Норман, А.В. Янилкин*, Гомогенное зарождение дислокаций, *Физ. тв. тела*, т. 53, вып. 8, 2011.
- [13] *B. Hopp, T. Smausz, T. Csizmadia et al.*, Production of nanostructures on bulk metal samples by laser ablation for fabrication of low-reflective surfaces, *Appl. Phys. A*, 113, 291-296, 2013.
- [14] *B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman et al.*, Optical ablation by high-power short-pulse lasers, *J. Opt. Soc. Am. B*, 13, 459-468, 1996.
- [15] *J. Hermann, S. Noel, T. E. Itina et al.*, Correlation between ablation efficiency and nanoparticle generation during the short-pulse laser ablation of metals, *Laser Phys.*, 18, 374-379, 2008.
- [16] *S.I Ashitkov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky et al.*, Formation of Nanocavities in the Surface Layer of an Aluminium Target Irradiated by a Femtosecond Laser Pulse, *JETP Lett.*, 95, 4, 176-181, 2012.
- [17] *N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov et al.*, Ultrafast Lasers and Solids in Highly Excited States: Results of Hydrodynamics and Molecular Dynamics Simulations, *J. Phys.:Conf. Ser.*, 510, 012041, 2014.

- [18] *C. Wu and L. Zhigilei*, Microscopic mechanisms of laser spallation and ablation of metal targets from large-scale molecular dynamics simulations, *Appl. Physics A*, 114, 11-32, 2014.
- [19] *V. V. Zhakhovskii and N. A. Inogamov*, Elastic-plastic phenomena in ultrashort stress waves, *JETP Lett.*, 92, 8, 521-526, 2010.
- [20] *S.I. Ashitkov, M.B. Agranat, G.I. Kanel et al.*, Behavior of Aluminum near an Ultimate Theoretical Strength in Experiments with Femtosecond Laser Pulses, *JETP Lett.*, 92, 8, 516-520, 2010.
- [21] *K. Sokolovski-Tinten, J. Bialkovsky, A. Cavalleri et al.*, Transient States of Matter during Short Pulse Laser Ablation, *Phys. Rev. Lett.*, 81, 224-227, 1998.
- [22] *Н.А. Иногамов, А.М. Опарин, Ю.В. Петров, Н.В. Шапошников, С.И. Анисимов, Д. фон дер Лунде, Ю. Майер-тер-Фен*, Разлет вещества нагретого ультракоротким лазерным импульсом, *Письма в ЖЭТФ*, том 69, вып. 4, с. 284-289, 1999.
- [23] *V.V. Zhakhovsky, K. Nishihara, S.I. Anisimov, N.A. Inogamov*, Molecular-dynamics simulation of rarefaction waves in media that can undergo phase transitions, *JETP Lett.*, 71, 167-172, 2000.
- [24] *С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, К. Нишихара, А.М. Опарин, Ю.В. Петров*, Разрушение твердой пленки в результате действия ультракороткого лазерного импульса, *Письма в ЖЭТФ*, том 77, вып. 11, с. 731-736, 2003.
- [25] *S.I. Anisimov, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov et al.*, Simulation of the expansion of a crystal heated by an ultrashort laser pulse, *Appl. Surf. Sci.*, 253, 6390-6393, 2007.
- [26] *M.E. Povarnitsyn, T.E. Itina, M. Sentis, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov*, Material decomposition mechanisms in femtosecond laser interactions with metals, *Phys. Rev. B*, 75, 235414, 2007.

- [27] *A.K. Upadhyay, N.A. Inogamov, B. Rethfeld, H. Urbassek*, Ablation by ultrashort laser pulses: Atomistic and thermodynamic analysis of the processes at the ablation threshold, *Phys Rev B*, 78, 045437, 2008.
- [28] *B.J. Demaske, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, I.I. Oleynik*, Ablation and spallation of gold films irradiated by ultrashort laser pulses, *Phys Rev B*, 82, 064113, 2010.
- [29] *P.M. Leguay, A. Levy, B. Chemier et al.*, Ultrafast short-range disordering of femtosecond-laser-heated warm dense aluminium, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 245004, 2013.
- [30] *V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, Yu. V. Petrov et al.*, Molecular-dynamics simulation of femtosecond ablation and spallation with different interatomic potentials, *Appl. Surf. Sci.*, 255, 9592-9596, 2009.
- [31] *N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky*, Formation of nanojets and nanodroplets by an ultrashort laser pulse at focusing in the diffraction limit, *JETP Lett.*, 100, 4-10, 2014.
- [32] *E.L. Lee, C.M. Tarver*, Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives, *Physics of Fluids*, 23, 12, 2362-2372, 1980.
- [33] *Ч. Мейдер*, Численное моделирование детонации, М.: Мир, 1985.
- [34] *Г.Т. Афанасьев, В.К. Боболев*, Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом, М.: Наука, 1968.
- [35] *В.Г. Морозов, И.И. Карпенко, С.Е. Куратов и др.*, Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ, *Химическая физика*, т. 14, № 2-3, 32, 1995.
- [36] *J.E. Reaugh*, Progress in model development to quantify High Explosive Violent Response(HEVR) to mechanical insult, LLNL-TR-405903, 2008.

- [37] *J.F. Kerrisk*, A Model for Shear-Band Formation and High-Explosive Initiation in Hydrodynamics Code, LANL Report LA-13127, Los Alamos, 1996.
- [38] *F.J. Zerilli, R.H. Guirguis, C.S. Coffey*, A burn model based on heating due to shear flow: proof of principle calculations, 12 International Detonation Symposium, 2002.
- [39] *F. Roters, Ph. Eisenlohr, Th. R. Bieler, D. Raabe*, Crystal Plasticity Finite Element Methods in Materials Science and Engineering, Wiley-VCH, Weinheim, 2010.
- [40] *С.М. Бахрах, Н.А. Володина, А.Р. Гушанов*, Инициирование детонации твердого ВВ при низкоскоростных воздействиях. Физическая модель и численное моделирование, «Молодежь в науке», Сборник докладов Четвертой научно-технической конференции, Саров, 2005.
- [41] *A. Gushanov, N. Volodina, G. Belov, N. Khvorostin, D. Isheev*, Numerical Simulation of Experiments on the Low-Velocity Impact on HMX-Based HE Using Explosive Transformation Kinetics, Journ. of Energ. Mat., 28, 50-65, 2010.